

乡村院落资源代谢科学基础及研究框架

薛冰¹, 许耀天^{1,2}, 李宏庆³, 张宇鑫^{4,5}, 任婉侠¹

(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. 柏林工业大学循环经济与回收技术系, 德国 柏林 10623; 4. 山东师范大学地理与环境学院, 济南 250358;
5. 潍坊现代农业与生态环境研究院, 山东 潍坊 261071)

摘要: 对入地系统资源进行一体化整合能够有效推动院落资源空间科学营建及促进区域生态与经济发展。伴随老龄化与人口缩减加剧, 中国作为传统农业大国, 未来绝大部分乡村居住空间更有可能回归到传统院落式结构。因此, 论文基于马斯诺需求层次理论、资源代谢理论等科学基础理论, 探讨中国未来乡村院落发展情景, 同时耦合资源代谢分析体系与院落微地理—经济—社会—产业系统的基本特征, 系统化院落资源空间配置与流动规律, 综合考虑未来乡村居民各层级需求, 建立了基于马斯诺需求层次理论改进的院落资源空间演变概念模型、空间复合结构下的院落全景资源流动模型、院落资源代谢评价指标体系与面向未来的乡村院落资源代谢研究框架, 并系统阐释了院落资源代谢研究与空间功能及区域政策的外部科学关联。论文通过创新提出系统规范的以独立院落为研究对象的资源代谢科学基础及研究框架, 从中微观尺度评估资源在院落内的流动规律, 有助于精确识别区域内资源的最优分配路径, 使资源配置、生态效益、经济效益、社会效益与居民情绪效益均能够被最大化实现, 从而为实现院落资源全域化整合与多元化增值提供科学支撑, 为乡村地区的发展决策提供高效指导, 精准推动乡村人居环境的可持续发展。

关键词: 乡村院落; 居民需求; 资源代谢; 评价指标; 人地关系

乡村院落是基于原始自然环境人为建造的传统居住空间, 也是有关自然—人文—社会综合性物质世界与人类精神世界的融合场所, 具有多重自然调节功能、社会文化功能以及人类生存与情感需求功能^[1-3]。同时, 院落也是中国传统文化传承的载体之一, 是物质空间与文化美学等的基础治理边界和最小单元, 更是建筑艺术、文化传承、生活方式乃至身份阶层的极致体现^[4-9]。本文认为, 从狭义上讲, 院落是房屋(居住建筑)前后用墙或栅栏围起来的空地^[10-12], 而本文取其更为广义上的地理空间概念, 具

体来看, 院落结构包括封闭式院落结构和开放型院落结构两种类型: 封闭式院落是围墙或栅栏围起来的全部地理空间实体; 开放型院落虽然未设有围墙等物理边界, 但它同样具有清晰的治理边界范围, 即它是一种基于人的存在环境或使用需求作为导向进行划分的空间形式^[3], 其所属家庭治理边界内的全部地理空间便是它本身, 而这个全部地理空间实体包含了建筑与庭院两大核心构造。随着聚落的发展与人类物质生活的充实, 院落内建筑不仅是传统意义上为生存所搭建的单一物质实体, 庭院也不仅是

收稿日期: 2024-09-12; 修订日期: 2024-10-29。

基金项目: 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(XDA28090300, XDA28060300); 辽宁省科技创新重大专项(E2431721G8); 山东省潍坊市软科学计划(2022RKX028, 2023RKX119)。[Foundation: Regional Development Young Scholars Program of Chinese Academy of Sciences, No. 2021-003; Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No. XDA28090300 and XDA28060300; Major Special Project for Science and Technology Innovation of Liaoning Province, No. E2431721G8; Soft Science Plan of Weifang City, Shandong Province, No. 2022RKX028 and 2023RKX119.]

第一作者简介: 薛冰(1982—), 男, 江苏连云港人, 研究员, 教授, 博士生导师, 主要从事人地关系分析与区域可持续发展研究。
E-mail: xuebing@iae.ac.cn

引用格式: 薛冰, 许耀天, 李宏庆, 等. 乡村院落资源代谢科学基础及研究框架[J]. 地理科学进展, 2024, 43(11): 2107-2123. [Xue Bing, Xu Yaotian, Li Hongqing, et al. Research framework and scientific basis for resource metabolism in rural courtyards. Progress in Geography, 2024, 43(11): 2107-2123.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2024.11.001 CSTR: 32072.14.dlkxjz.2024.11.001

为生计而种养粮食作物的单一外部场所,而更是和人类精神文明休戚与共的集文化、艺术、经济、社会环境与时代背景于一体的家庭综合活动空间^[14-15]。而以院落空间为居住载体的家庭,作为院落的核心创造与支配力量,是在物质和社会要素之间建立动态联系以及形成让家庭成员获得积极情绪和特定身份的秩序的社会关系矩阵^[16-17]。如今的院落空间作为一种耦合建筑空间与庭院空间的传统营建方式、居民生活的最基本单元及家庭的核心载体,早已在物质与精神两个维度上服务于社会与人群,极大程度上作用于人们的生产生活方式^[18],同时其形态结构也反映着时代的发展与变革^[19]。因此,基于院落空间开展相关研究对于推动实现人类福祉与居住环境可持续发展的协调统一具有重要意义。

近年来,随着人们对健康生态和舒适生活的追求以及人与自然和谐相处绿色发展理念的深入,政界与学界越来越关注乡村人居环境的发展模式。一方面,为改善乡村人居环境,中国政府出台了《乡村建设行动实施方案》《农村人居环境整治提升五年行动方案(2021—2025年)》等多项政策;另一方面,一些中国学者在进行乡村发展问题研究时,开始更多地关注受传统文化与乡土情怀影响下的乡村生态环境与可持续发展^[20-21]、居民生计需求与生活福祉^[22-23]等更具人文关怀与生态保护现实性的问题。然而随着新型城镇化进程的加快,实现城乡融合的目标迫在眉睫^[24],未来乡村居住空间格局面临着更加多元化的发展方式,例如为提供更多的居住空间,部分乡村可能会向高楼建筑式的城镇化方向发展,在县城周边或重点乡镇内建设中高层住宅区。但中国作为传统农业大国,人们对耕种的热爱和对自然的亲近早已根植于心,更渗透到日常生活及价值观中,成为一种重要的文化象征。而院落式的居住模式,如今因其能够完美融合现代中国人对乡土情怀和自然生态的向往而备受青睐。院落式建筑格局不仅能提供充足的空间供人们进行园艺活动,也能为家人、邻里之间的社会互动提供良好环境。同时伴随老龄化与人口缩减的加剧,未来的乡村居住空间也更有可能会回归到独立开阔、自给自足的传统院落式结构,以满足人们对自然、健康与社会交往的需求。这种回归不仅体现了对传统农业文化的认同,也包含了人们在现代化进程中对乡土生活的向往,能够使未来中国乡村的发展在传承与创新中找到新的平衡。因此,当前迫切需要更多

以乡村院落为主体的系统性研究视角,以期从源头上有效解决中国乡村可持续发展问题。

过去长期以来,国内以乡村院落为研究对象的科学研究主要集中在传统院落或民居的建筑设计及空间形态规划方面,呈现出以建筑科学的工程技术研究为主体、考古与文旅规划的应用基础研究为次主体的研究领域分布特征^[25]。部分学者在民居设计技术层面探讨传统院落民居的地域适应性特征^[26-27]、院落节能改造^[28-29]、室内外自然环境仿真模拟^[30-31]等研究议题;部分学者在考古文旅层面关注民居建筑体系的形成渊源^[32-33]、建筑遗产识别、保护与文旅创新^[34-35]、乡村院落旅游与乡土情结^[36-37]、乡村居民生活满意度^[38-39]等研究方向;还有部分学者在空间规划应用层面分析院落时空分化与演进机制^[13,40-41]、院落空间优化策略^[12,42-43]、院落空间结构测度与认知^[44-45]等研究主题。而当前在全球气候变暖、“双碳”战略与可持续发展目标持续推进的背景下,乡村院落研究呈现出转向以资源高效利用与低碳排放为目标的院落人居空间可持续发展的研究新特点。乡村院落资源代谢是指以院落为系统边界的社会经济系统与自然环境之间物质、能量和信息的交换过程,因此院落人居环境可以被视为一个具备资源代谢转化机制的空间系统基本单元^[46-47]。近几年,中国出现了一些将资源代谢理念融入乡村微小尺度空间优化建设的案例研究,标志着中国乡村资源代谢研究进入一个新的视野,例如周忠凯等^[48]在乡村尺度探讨了村域生态系统的资源流动与物质循环特征并对其进行了优化设计实践,周传斌等^[49]围绕乡村生态庭院经济模式与环境改善目标提出了寒旱区农村庭院生态工程建设模式。同时,鉴于乡村院落是乡村资源代谢研究最基本的空间单元,迫切需要提出系统且规范的以独立院落为研究对象的资源代谢科学基础及研究框架。因此,本文以乡村地区家庭居住用院落作为资源代谢空间治理的最基本边界,从未来乡村院落的功能需求角度系统分析院落空间的演变过程,提出院落资源代谢研究的资源流动过程框架(空间复合结构下的院落全景资源流动模型)与应用研究理论框架(资源代谢、社会经济与空间计算技术协同关系图),讨论院落尺度下资源代谢研究与治理边界的空间功能机理关联及其与区域政策间的衔接问题,将对点对点精准落实到乡村每户居民并全方位推动乡村人居环境可持续发展至关重要。

1 未来乡村院落的功能需求及空间系统演变

随着中国社会经济的快速发展以及人民生活水平的日益提高,乡村居民对所住院落空间的要求也不断提高,提升院落功能品质与维护人民身心健康逐渐成为影响院落空间设计的重要考量之一。^[50-53]。而人类与自然本身存在相互作用关系^[54],人类始终最大限度依赖并影响着自然环境,因此人类的经济社会与心理需求变迁在极大程度上决定了其所处空间的功能演变。如图 1 所示,院落空间结构是院落功能实现的载体,院落资源流动情况是院落功能表达的形式,不同程度的环境性、经济性 & 不同功能需求背后隐含的心理性是决定院落资源流动的重要驱动因素。例如,居民的水资源节约利用意识会促使水资源循环利用流动强度增强;绿色低碳意识会助推对资源的可持续规划管理,促进废弃物循环利用、利用生物质资源(如农作物残余)制作有机肥料等主观行为的增加,从而提高资源利用效率;对居住环境美的追求意识会扩大鲜花植被的生态系统服务范围,进而增加其休闲功能的表达。因此,在对未来乡村院落进行规划时,需要更加关注院落功能需求与空间结构的相互作用机理问题,系统考虑顺应时代发展背景下的院落资源代谢场景核算结果,以推动院落小尺度人地系统的可持续发展,助力人与自然和谐共生现代化目标的实

现^[55]。本文通过耦合乡村居民生产生活中的多方面需求与院落空间结构及其资源要素,进行人类行为与院落空间系统演变的分层级识别与划分,从而有利于厘清乡村居民与其居住空间复合系统的相互作用关系,以更好地应对区域内的生态响应与可持续发展要求。

马斯洛需求层次结构作为心理学中经典的激励理论,将人的需求描绘成金字塔内的 8 个层级,从结构底部向上,分别包括:生理需求、安全需求、归属需求、尊重需求、求知需求、审美需求、自我实现以及自我超越,人们按照上述层级不断提升对自身需求的追求,并从中得到回馈与激励^[56]。为了深入剖析中国乡村院落居民的主观幸福感来源及其与客观空间环境间的对应关系,本文引入马斯诺需求层次理论,将其八大层级划分为三大阶段,按照乡村地区居民在村落自然环境与社会群体中的不同地位与对应生活需求进行分级改进,得到图 2a。同时推导不同层次乡村居民的资源活动行为特征,并与对应院落活动空间进行关系映射,归纳院落资源空间系统演变规律,得到图 2b。其中,院落资源空间系统包括生态空间、物质活动空间与社会活动空间。生态空间表现为覆盖物质活动与社会活动的自然环境背景;物质活动空间是居民日常生活所必需的基本空间环境,具有居民用来实现粮食种植、生产加工、晒谷理谷、家禽养殖与洗衣晾晒等功能;社会活动空间能够与归属、认同、自我实现等主观

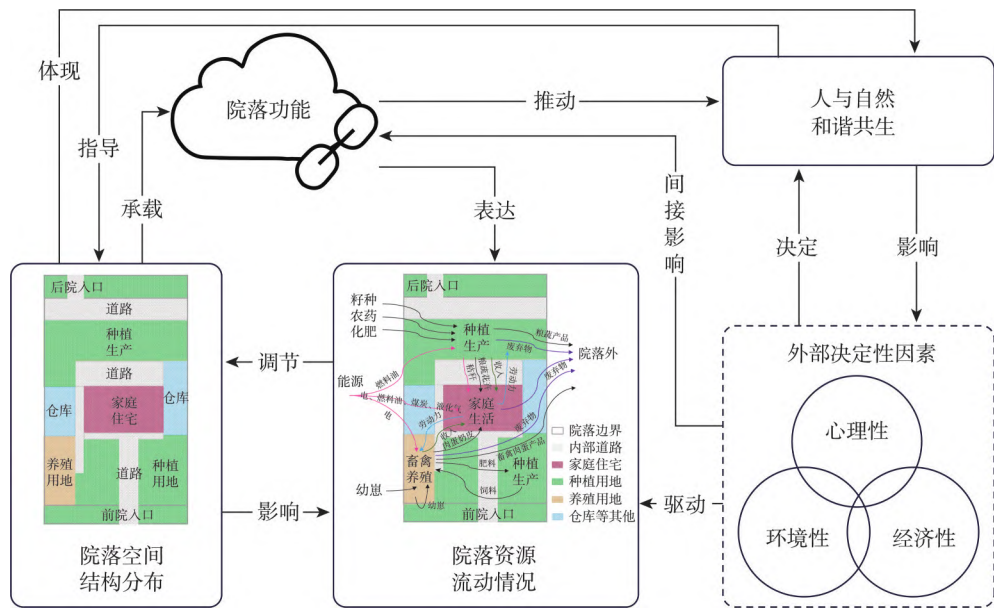


图 1 院落结构、功能、资源流动及其驱动因素的关系

Fig.1 Relationship between courtyard structure, function, resource flow and its driving factors

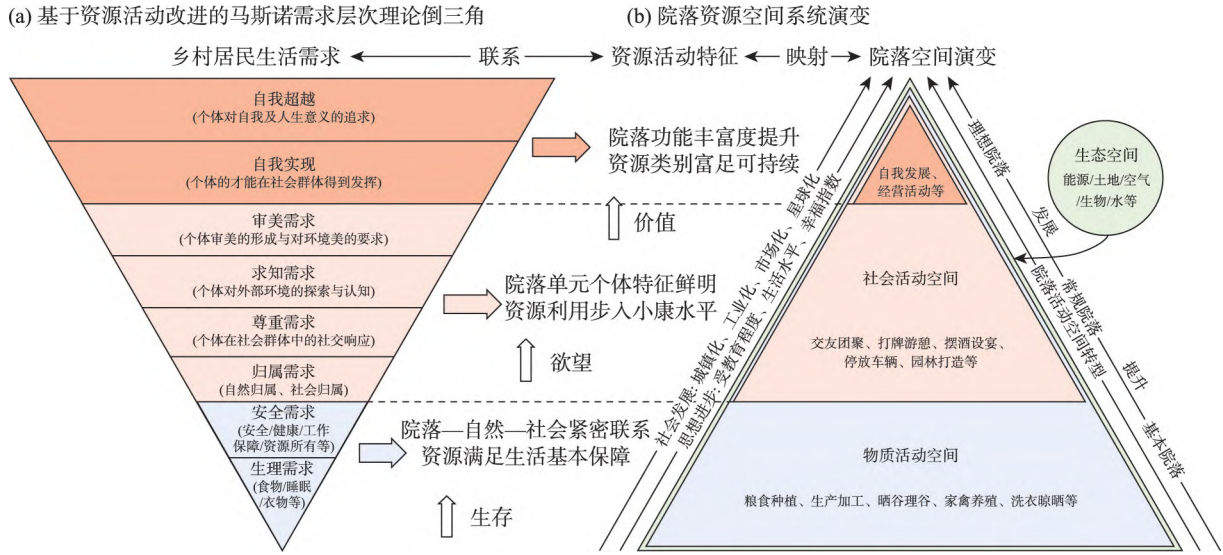


图2 基于马斯诺需求层次理论改进的院落资源空间演变概念模型

Fig.2 A conceptual model of courtyard resource space evolution based on Maslow's hierarchy of needs theory

空间相映射,具有居民用来实现交友团聚或休闲娱乐等的功能^[57-58]。

具体来看,在国家发展初期,随着乡村地区居民资源消费能力的提升,生活需求逐渐从生理、安全等满足基本生存条件的基础物资需求阶段转向更为丰富的求知、审美等精神文明需求,但绝大部分乡村家庭通常很难达到求知需求及以上的更高需求层级。随着社会经济发展水平的改变,新时期的居民生活水平有了质的提高,生活需求也更丰富多样,在新农村建设的带动下,乡村居民逐渐开始向内挖掘自身需求,追求满足更高层次的自我人生价值实现与创新发展的生活状态。因此,本文将该概念模型划分为三个阶段:生存、欲望、价值,以实现由满足基本生活保障到生活小康再到资源富足的居民生活可持续发展的巨大转变。在阶段一,乡村居民生活最基本的“生理需求”与“安全需求”需要在其进行基本生产生活活动的条件上获取,包括充足的食物与水、良好的睡眠及居民的健康保障、收入保障、家庭安全等方面。进入阶段二,基于居民自身“归属需求”与“尊重需求”,个体与自然和社会开始建立起密不可分的联系,个体在群体中社交响应逐渐提高,院落逐渐进入一定的社会活动空间。随着个体对外部环境的不断探索与认知,个体开始产生进一步的“求知需求”与“审美需求”,个人审美也不断成型并得以提升,对环境美的要求逐渐指挥着院落结构的改变,从而使得院落单元的个体特征也更为鲜明,资源利用能力逐步进入小康水平。最后

到达阶段三,随着个体不断成长,个体能力在社群体得到发挥,个体更加注重对自我以及人生意义的追求,因此在逐步挖掘“自我实现”与“自我超越”需求的过程中,其所住院落结构及其功能的丰富度也随之提升,资源利用类别也更为富足,同时也进一步强化了院落可持续的资源管理方式。因此,随着社会发展与思想进步,基于资源充沛的生态空间本底,乡村居民生活的院落空间也逐渐从单一的基本物质活动空间转向多元的常规社会活动空间,进一步随着居民自我发展与超越意识主导性的增强而转向到理想社会活动空间,院落形式也随之从满足生存必需的基本院落配置转向具备日常生产生活及社会活动必需的最为普遍的常规院落配置,再转向功能更为丰富的最高级别理想院落配置。

2 院落资源代谢评价指标体系与研究框架

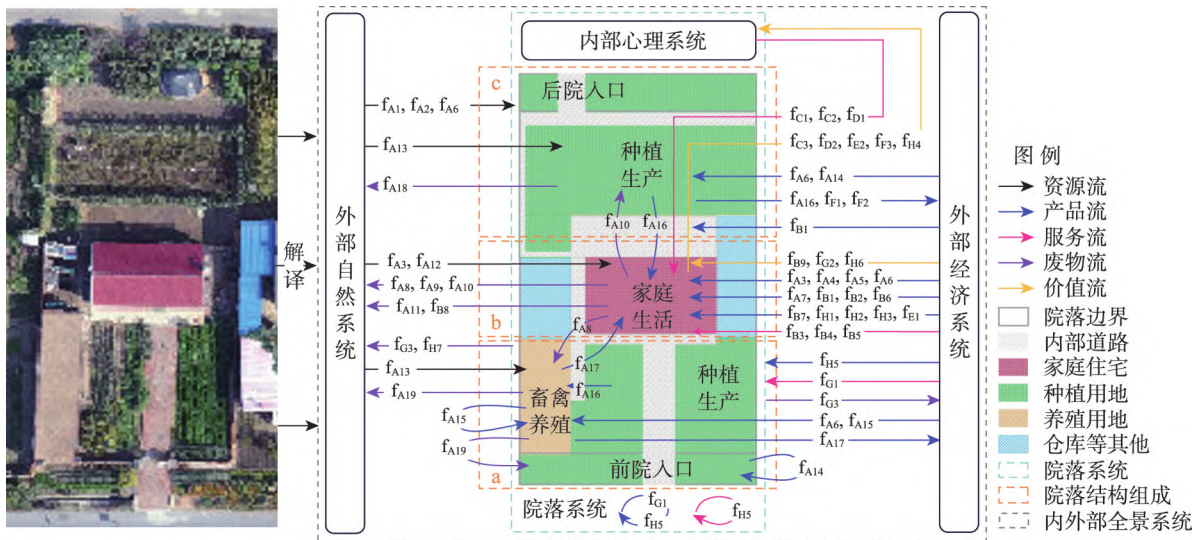
2.1 资源流动模型及代谢评价指标体系

为精准评估乡村院落资源代谢模式,本文在中国北方地区随机抽取样点地开展乡村实地调研与无人机低空影像采集工作,进行5 cm×5 cm高分辨率无人机影像特征解译,获得大量一手资料。根据广泛调研,以院落治理边界作为全景资源流动模型的研究边界,本文发现东北地区范围内的大部分独立院落的空间结构由三个区块组成(图3):a区域(前院)、b区域(住宅)以及c区域(后院),而东北地区以

外的中国的绝大部分乡村院落则由两个区块组成：a区域(前院)及b区域(住宅)。除包含a+b+c(场景1：住宅前后均有院子)的三元结构以及包含a+b的二元结构(场景2：住宅+前院)之外，一些家庭的院落空间结构组织形式还覆盖了只包含b(场景3：单一住宅)的一元结构、包含b+c(场景4：住宅+后院)的二元结构。以辽宁省沈阳市马家村和茨榆坨村为例，为场景1的三元院落空间结构占比分别高达95.8%和97.5%；以山东省枣庄市东桥头村和河南省商丘市邑西里村为例，为场景2的二元院落空间结构占比均高达100%。因此，本文以乡村地区独立的家庭院落为研究对象，选取同时涵盖前院、住宅与后院的院落结构类型，构建了全面覆盖a+b+c三元结构的复合院落全景资源流动模型(图3)，该模型涉及的全部流动要素指标详见表1。该模型在物质流分类上，依据物质流分析法和相关文献^[59-64]，结合乡村院落内活动实际情况，将院落内及院落与外部自然系统、经济系统及居民内部心理系统间的物质流分别划分为资源流、产品流、服务流、废物流、价值流。其中，资源流指外部自然系统向院落内部输送的自然资源，包括化石燃料、电、太阳能等能源产品以及生活用水；产品流指外部系统与院落活动及院落活动内部流动的产品，包括农畜投入品、居民衣食住行用商品、经营活动所必需的商品以及向外出售盈利的产品等；服务流指外部经济系统和院落居民相互提供方便的活动，包括生活生产服务、

建造服务、医疗养老保障及经营服务等；废物流指院落向外部系统排放及院落内部循环的废弃物，包括生活垃圾、生活污水、人与牲畜的粪尿、农业废弃物、建筑废弃物、经营垃圾和废水以及可回收废弃物；价值流指院落内活动所产生或投射的价值，包括在经营活动的实施下外部经济系统向院落流动的净收入以及院落活动向居民内部心理系统所投射的情绪价值。基于该基础复合模型，可以进一步展开院落资源代谢评估的三大阶段：①与院落相关联的边界内外活动中的物质交换过程识别；②院落资源流、产品流、服务流、废物流、价值流的代谢全过程拆解；③院落全景资源代谢核算及结果分析。

以同时满足生计需求、生活福祉与可持续发展要求的理想院落为例，其居住功能通常包括以下三方面：基础生产条件(菜园与果树等种植活动)、绿色生态模式(健康宜居、能源清洁、资源循环利用等模式)以及无忧生活状态(良好的治安，舒适便利的住宅布局，园林式庭院，和睦融洽的邻里关系，便捷的交通、教育、医疗、就业等物质与经济支持)。因此，本文结合基于改进马斯诺需求层次理论的院落资源空间演变概念模型(图2)，从乡村居民需求维度分层级全面建立了面向未来的乡村院落资源代谢评价指标体系(表1)，各指标的具体流动情况如图3所示。该指标体系涵盖了未来乡村理想院落场景下人类各方面的生活生产活动需求，并从投入、产出与收入三方面进一步划分其资源流动要素，以通过



注：图中资源流动要素 $f_{A1} \sim f_{H7}$ 的具体含义详见表1。

图3 空间复合结构下的院落全景资源流动模型

Fig.3 Courtyard panoramic resource flow model under the spatial composite structure

表1 乡村院落资源代谢评价指标体系

Tab.1 Evaluation indicator system of rural courtyard resource metabolism

需求维度	活动指标	流动方向	编号	资源流动要素	衡量指标	单位		
生理需求(A)	生活活动	投入	f _{A1}	空气(质量)	空气质量指数	—		
			f _{A2}	光照(强度)	地表太阳辐射	W/m ²		
			f _{A3}	生活用水	水费	元/a		
			f _{A4}	食物	总成本	元/a		
			f _{A5}	衣着	总成本	元/(a·人)		
			f _{A6}	能源	电力	电费	元/a	
					液化石油气	气费	元/a	
		天然气			气费	元/a		
		汽油			汽油费	元/a		
		柴油			柴油费	元/a		
		煤炭			重量	t/a		
		f _{A7}	清洁能源配置	太阳能	配置费	元		
				生物质能	配置费	元		
		产出	f _{A8}	固体废弃物	生活垃圾	重量	t/a	
					剩饭剩菜	重量	t/a	
				f _{A9}	液体废弃物	生活污水	重量	t/a
				f _{A10}	有机碳流失	人体粪尿	重量	t/a
				f _{A11}	气体废弃物	CO ₂ 排放	重量	kg/m ³
						SO ₂ 排放	重量	kg/m ³
烟尘排放	重量		kg/m ³					
f _{A12}	清洁能源发电		太阳能	发电量	kWh/a			
			生物质能	发电量	kWh/a			
生产活动	投入		f _{A13}	生产用水	重量	t/a		
			f _{A14}	种植投入品	化肥	重量	t/a	
					农药	重量	g/a	
		种子(谷物)			总成本	元/a		
		种子(豆类)			总成本	元/a		
		种子(蔬菜)			总成本	元/a		
		种子(经济作物)			总成本	元/a		
		种子(苗圃)			总成本	元/a		
		f _{A15}			养殖投入品	饲料	重量	t/a
		f _{A16}	粮蔬产品	谷物	重量	kg/a		
				豆类	重量	kg/a		
		f _{A17}	畜禽产品	蔬菜	重量	kg/a		
				经济作物	重量	kg/a		
				苗圃	重量	kg/a		
				产崽	总产量	只/a		
				产蛋	总产量	kg/a		
				产奶	总产量	kg/a		
				成年畜禽(肉用)	总产量	kg/a		
		f _{A18}	固体废弃物	农业废弃物(秸秆)	总产量	kg/a		
农业废弃物(地膜)	占地面积			m ²				
f _{A19}	有机碳流失	牲畜粪尿	重量	t/a				

接下页

续表 1

需求维度	活动指标	流动方向	编号	资源流动要素	衡量指标	单位		
安全需求(B)	生活活动	投入	f _{B1}	建筑	道路(水泥路/砖路/土路等)	热辐射	W/m ²	
					建筑结构(砖混结构/框架结构/木结构/彩钢棚等)	传热系数	W/(m ² ·K)	
						使用年限	a	
						建筑面积	m ²	
					屋顶(水泥瓦/红瓦/彩钢瓦等)	传热系数	W/(m ² ·K)	
						使用年限	a	
				f _{B2}	私人交通	自行车	使用频率	次/周
						摩托车	使用频率	次/周
					三轮车	使用频率	次/周	
					小汽车	使用频率	次/周	
					电动车	使用频率	次/周	
			f _{B3}	医疗保障	医药消费	年均消费额	元/a	
					医疗保险	年均消费额	元/a	
			f _{B4}	养老保障		年均消费额	元/a	
		f _{B5}	日常通信		话费	元/a		
		f _{B6}	家用设备(家具/电器/电子产品)		投入成本	元		
		f _{B7}	现代日用杂品(洗衣液/洗洁精/卫生用纸等)		投入成本	元		
		产出	f _{B8}	建筑废弃物	重量	t/a		
	生产活动	收入	f _{B9}	在外务工	收入额	元/a		
归属需求(C)	生活活动	投入	f _{C1}	与家人相处时间	时间	h/周		
			f _{C2}	邻里相处时间	时间	h/周		
		产出	f _{C3}	情绪价值	时间	h/周		
	尊重需求(D)	生活活动	投入	f _{D1}	在外务工时间	时间	h/周	
		产出	f _{D2}	情绪价值	时间	h/周		
求知需求(E)	生活活动	投入	f _{E1}	教育文化(书本文具/知识付费等)	投入成本	元/a		
		产出	f _{E2}	情绪价值	时间	h/周		
审美需求(F)	生活活动	投入	f _{F1}	观赏植被	投入成本	元/a		
			f _{F2}	庭院建设(私人花园/果园打理等)	投入成本	元/a		
			产出	f _{F3}	情绪价值	时间	h/周	
自我实现(G)	生产活动	投入	f _{G1}	农副产品经营	粮食商品化	投入成本	元/a	
					养殖商品化	投入成本	元/a	
					果园商品化	投入成本	元/a	
					装修运输等服务	投入成本	元/a	
		收入	f _{G2}	农副产品经营	农副产品经营总收入	收入额	元/a	
		产出	f _{G3}	农副产品经营	经营垃圾、废水	重量	t/a	
					可回收废弃物(塑料/废纸/金属等)	重量	t/a	
自我超越(H)	生活活动	投入	f _{H1}	娱乐爱好	投入成本	元/a		
			f _{H2}	运动养生	投入成本	元/a		
			f _{H3}	饲养宠物	投入成本	元/a		
		产出	f _{H4}	情绪价值	时间	h/周		
	生产活动	投入	f _{H5}	文旅项目自营	乡村文旅产品	投入成本	元/a	
					文旅民宿自营	投入成本	元/a	
					民俗体验(扎染/陶艺/垂钓等)	投入成本	元/a	
收入					f _{H6}	文旅项目自营	文旅项目自营总收入	收入额
	产出	f _{H7}	文旅项目自营	经营垃圾、废水	重量	t/a		
				可回收废弃物(塑料/废纸/金属等)	重量	t/a		

更加微观细腻的视角对院落资源流动展开更为精细化的衡量和测度。针对不同维度下的院落资源流动要素范畴,其中,生理需求维度(A)包含适应现代居民生存的呼吸、食物、水等基本生存条件下日常生产生活投入产出普遍涉及的19类指标;安全需求维度(B)包含有关居民居住安全、健康保障、交通通信以及日常家用工具等9类指标;归属需求维度(C)强调居民与家人、朋友等建立情感关系的过程,包括居民与家人的相处时间、与邻里的相处时间及其提供的情绪价值等3类指标;尊重需求维度(D)强调居民日常工作在其所处社会群体中得到的社交响应,包括居民在外务工时间及其提供的情绪价值等2类指标;求知需求维度(E)指居民个体对外部环境的探索与认知,包括对教育文化的投入成本及其提供的情绪价值等2类指标;审美需求维度(F)强调居民个体审美对环境美的要求,包括对观赏植被及庭院建设的投入成本及其提供的情绪价值等3类指标;自我实现维度(G)指居民个体的才能在社会群体得到发挥的过程,在乡村院落主要以农副产品经营的形式体现,因此包括农副产品经营的投入、收入及废弃物产出等3类指标;自我超越维度(H)指居民个体对自我及人生意义的追求,本文将其延伸为对自我身心发展的关注及对创新生活的探索,因此涵盖了居民对其娱乐爱好、运动养生、饲养宠物的投入成本及其提供的情绪价值,以及对文旅项目自营的投入、收入及废弃物产出所涉及的7类指标。

2.2 研究框架

在确定院落资源代谢评估指标类型的基础上,为实现不同时空配置下乡村院落全系统资源代谢的多情景比较,深入院落资源代谢与多学科融合研究,本文构建了复合院落资源代谢、社会经济与空间计算的技术协同关系研究框架(图4)。该框架的核心思想是通过耦合资源代谢分析体系与院落微地理—经济—社会—产业系统各要素及其时空特征,开展基于数学系统表达的院落资源系统全生命周期下的最小成本技术布局优化,以地理网格化形式精准匹配可持续发展模式与村落环境经济地理单元,从而针对性地增加院落级别的生态产品与服务供给,推动实现微小层面生态—社会—经济系统的同步升级、同步增值与同步受益。该框架主要由以下4个模块组成:①产业生态系统资源代谢分析指标体系;②院落系统所处的地理—经济—社会—产业空间环境背景;③多情景设置下的院落结构发

展需求及相关预测;④院落全系统资源代谢空间模型构建以实现终端活动空间的优化。其研究的具体步骤为:

首先,从净产业生态系统视角对院落的资源流动进行模块化拆解与分析,包括资源输入、资源使用、环境胁迫以及系统循环共生四大板块。通过对目标院落深入开展实地调研、入户访谈与监控测量工作,获取大量一手本底数据,进而对其进行指标分类与相关计算,得到废弃物排放强度、清洁能源使用率、共生经济效益等有关资源代谢效应的核心终端数据信息结果。

其次,从院落所处的地理环境、经济发展、人口变动与新业态引进的基础背景角度出发,对该院落进行资源发展潜力展望。院落作为一个微小的地理—经济—社会—产业系统,受自然与社会环境的改变而有规律地进行阶段性更新迭代,具有一定的不确定性,因而掌握其背景信息对进一步为院落资源发展进行多情景设定具有积极的指导意义。

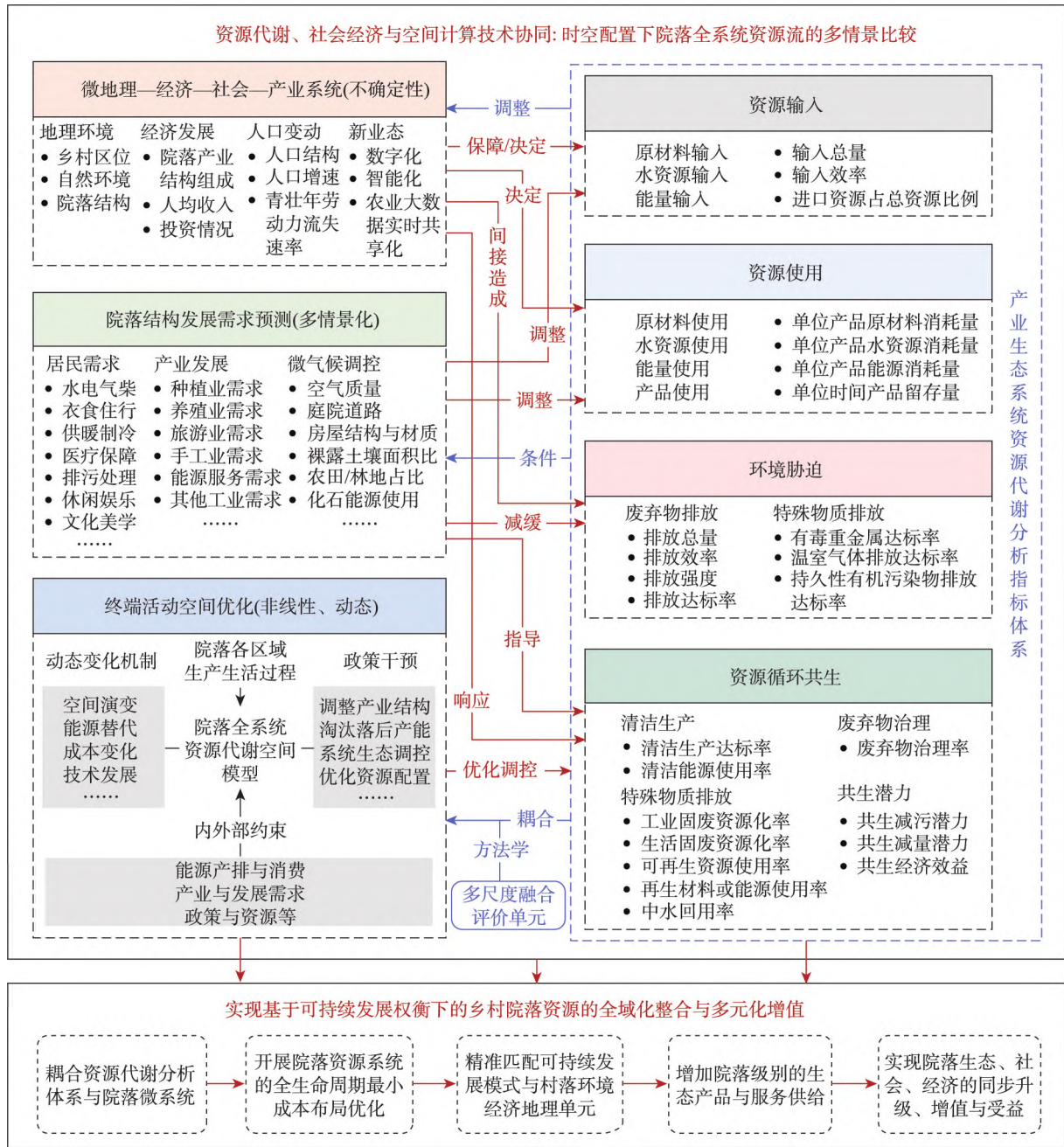
再次,结合多元化的院落居民需求、产业发展需求和微气候调控需求,对该院落进行空间结构发展的多情景化预测。基于表1所列各需求层级指标,主要从居民生计、生活、生产及生态效应等方面进行考虑,按照各类型需求的不同,进行未来院落不同发展方向的情景假设,仿真模拟微气候效应与调控、绿色能源链建设等场景,计算并分析不同情景条件下的各方面资源代谢效应,总结各情景发展的动态变化机制。

最后,结合上述机制与政策干预带来的影响,进一步考虑能源产排、产业发展需求、政策资源等的内外部条件约束,基于院落各区域的生产生活过程,借助GIS等平台的技术支持,耦合多尺度融合评价单元方法学,最终构建能够实现资源代谢测算、低碳测算、需求欲望空间测算、资源结构空间测算等功能的院落全系统资源代谢空间模型。该模型的建立与应用将有效提高个人与政府决策的科学性与前瞻性,为推动乡村繁荣发展及人与自然和谐共生提供有力支撑。

3 院落尺度资源代谢研究的外部科学关联

3.1 院落治理边界与资源代谢间的功能牵引

自然环境资源代谢的目的在于探究边界内的



注：蓝色虚线框内体系基于文献[65]构建的“产业生态系统资源代谢分析指标体系”进行改进。

图4 资源代谢、社会经济与空间计算技术协同关系

Fig.4 Collaborative relationship between resource metabolism, socioeconomic development and spatial computing technology

物质与能量流动规律,揭示其驱动机制和资源环境效应^[66],进而推动边界内各部门废弃物排放的减量化、资源化,削减人类直接从自然界获取的资源总量^[67]及其给环境带来的负面影响^[68]。从自然与人文社会的交互关系来看,本文认为院落是在个人最基本的综合治理边界范围内能够实现自然环境资源代谢的核心场所,它不仅是空间治理的重要界限,更具有综合性的概念,涵盖了领土、生产、经济及生

态等的多重功能,体现了多重代谢过程,且拥有领土主权、生产生活活动、社会经济代谢与生态代谢等独立事件的最小权力范围。相比院落,其所附属的家庭则是单一层面上的宏观社会治理基本边界,家庭资源代谢的研究对象始终围绕家庭成员活动开展且不具备功能属性,而当研究对象变为院落时,研究便不只围绕家庭基础碳代谢等传统问题,还涵盖了气候变化、政策调控等推动下不断产生的

碳源碳汇或经济代谢等更多维度的问题,比如配备太阳能电板等清洁能源装置能够实现部分碳汇从而弥补部分传统碳排放所带来的影响^[69],裸露土壤或生态砖路面相比水泥等不透水硬化路面能够降低居住空间微热岛效应并降低内涝风险从而带给居民更加舒适的居住环境^[70]。此外,院落治理边界定义了空间的物理范围,而明确的边界能够聚集并整合相关资源,有效控制资源的输入、存储、输出与再循环过程,从而优化院落结构功能与内部资源流动效率,并提升资源的循环利用率,确保院落功能的高效实现。因此,本文强调在院落治理边界下基于院落空间结构及其功能开展资源代谢研究的重要性和完备性。

3.2 院落资源代谢研究与区域政策间的衔接

院落资源代谢的科学研究与区域政策的制定实施之间层层递进,形成了一套良性循环的相互衔接流程(图5)。院落资源代谢是一项跨学科跨领域融合的交叉科学研究,其基础科学理论依据涵盖生态代谢、生态系统服务等生态学基础,院落结构、时空分异等地理学基础,建筑耗材与美学设计等建筑学基础,资源流动与交易、循环经济等经济学基础,居民需求和社会代谢等社会学基础,可持续发展指标评估、政策与管理等可持续发展理论基础,复杂系统分析、模型建立等系统科学基础,以及绿色技术应用、大数据分析等工程技术创新基础。长久以来,有关区域政策的制定和实施往往受限于传统的

单一调研访谈信息,其资源管理模式强调经济发展,但在一定程度上忽视了生态环境的平衡,而数据驱动的院落资源代谢研究成果能够提升资源管理的透明度和有效性,为制定新时代更加全面的可持续资源管理模式提供充分的科学平台支撑,如咨询报告、数字大屏等可视化产品以及嵌入模型模块的智能化工具。为推动人类福祉与居住环境可持续发展目标实现,政府在进行决策时应基于对院落资源流动的深入剖析,以科学的数据支持其可持续发展决策,包括从资源需求、可再生资源利用及废弃物管理等方面进行全面评估,从而推动政策的科学化和精细化。而院落资源代谢研究恰好能够为区域政策的制定提供详细的实践依据,通过案例情景分析证明可持续资源管理的有效性。例如,建立理想院落模式的示范单元可以促进当地政府在资源配置、环境保护和社会公平等方面的政策创新。此外,院落资源代谢研究与区域政策之间应建立起良好的反馈机制,不仅决策者能够通过系列工具实时了解院落资源利用状况及其生态环境效应而在政策执行过程中对其进行实时合理调整,科研工作者也能在不同的实施成效中得到反馈从而对评估模型进行优化。因此,院落资源代谢研究为区域政策的制定提供了新的视角和切入点,区域政策的实施为院落资源代谢研究提供了发展模式的验证平台和反馈机会,二者各司其职却又紧密结合,共同推动乡村可持续发展。

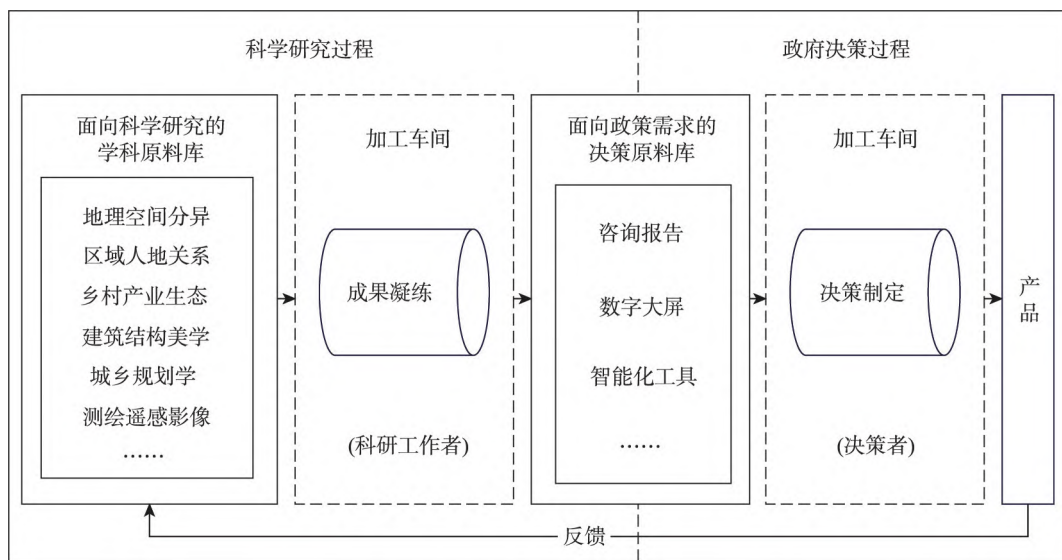


图5 院落资源代谢研究与区域政策间的衔接示意图

Fig.5 Schematic diagram of the connection between courtyard resource metabolism research and regional policy

4 结论、讨论与展望

4.1 结论

人地系统综合调控的最终目标是协调人与自然关系,谋求人与自然和谐共生^[71],对人地系统资源进行一体化整合能够有效推动院落资源空间科学营建并促进区域生态与经济发展。伴随老龄化与人口缩减加剧,中国作为传统农业大国,未来绝大部分乡村居住空间更有可能回归到独立开阔、自给自足的传统院落式结构。因此,本文基于马斯诺需求层次理论、资源代谢理论等跨学科基础理论,耦合资源代谢分析体系与院落微地理—经济—社会—产业系统的基本特征,系统化院落资源空间配置与流动规律,综合考虑未来乡村居民各层级需求,展望中国未来乡村院落发展情景,建立了基于马斯诺需求层次理论改进的院落资源空间演变概念模型、空间复合结构下的院落全景资源流动模型、院落资源代谢评价指标体系与面向未来的乡村院落资源代谢研究框架。最后,本文从院落治理边界、资源代谢功能及区域政策衔接等方面对院落资源代谢研究特点进行相应梳理与预测,论证其在指导乡村地区可持续发展过程中的理论与应用价值,以期提升院落资源的循环利用率,确保院落功能高效实现,同时为实现院落资源全域化整合与多元化增值提供科学支撑,为乡村地区的发展决策提供高效指导,最终精准推动实现院落微小层面生态—社会—经济系统的同步升级、增值与受益,促进乡村人居环境可持续发展。

4.2 讨论

4.2.1 乡村振兴与生态文明建设的时代性

随着城镇化进程加快,乡村面临着人口流失、院落荒化(指院落因为长期缺乏使用或维护,导致其荒废、无人管理、植被和基础设施退化等现象)、基础设施落后、资源撂荒、水资源污染等的发展问题与生态环境挑战。在新时代乡村振兴的背景下,如何发挥乡村院落资源潜力并盘活院落经济已成为一项重要的发展任务。院落资源代谢理论提倡院落资源的协同利用与循环利用,可以有效提高资源利用效率,降低生产生活成本,增加居民经济收益,从而持续推动乡村经济的可持续发展。同时,在当前生态文明建设的背景下,从院落这一民居综合治理的最基本空间单元入手,通过对院落开展以人类福祉为首要目标各类发展情景假设、动态模

拟及应用实践等的资源代谢研究设计,并与区域政策制定建立密切衔接与稳定的合作关系,可以有效减少院落资源浪费与环境污染,促进乡村人居环境的保护、改善与可持续发展。顺应时代发展方向,乡村院落资源代谢研究的理论与实践将有助于促进乡村振兴与生态文明建设的有机结合,推动乡村振兴发展与乡村生态环境的改善,实现经济社会与生态环境的协调发展。

4.2.2 居民生计需求与生活福祉的首要性

基于不同院落类型的资源代谢场景,对其空间结构进行良好的资源规划设计对满足乡村居民的生计需求和福祉有着积极影响。生计需求是居民追求基本生存和生活所需的物质和经济支持,包括食品、住房、医疗、教育、就业等方面,满足这些需求是确保人类生存的前提,也是生活的基础。福祉则更广泛地涵盖了居民物质、精神、社会和心理层面的满足与幸福感,如居民对自身生活状况的感知、对社会关系的满意程度、对自我实现和发展的追求等。生计需求和福祉间存在密切的联系,在满足生计需求的前提下,院落人居环境带来的主观幸福感能够比外部客观环境对乡村居民的生活满意度产生更为直接的作用^[72]。因此,为推动人类福祉与居住环境可持续发展的协调统一,以满足资源可持续代谢的理想院落情景为模板建设能够实现居民生计需求与福祉共生的美丽乡村是当前乡村发展的首要任务之一。综合考虑乡村院落的功能需求与人类福祉需求,有关院落资源代谢的创新性研究可以为乡村院落规划设计提供可行性方案,使乡村居民在生计需求得到满足的同时,能够高标准大幅提升福祉水平,打造更加宜居、绿色、繁荣、可持续发展的乡村院落。

4.2.3 院落小尺度资源代谢评估的重要性

院落小尺度资源代谢评估能够提供对资源流动更为细致的观察,获得更加丰富透明的多源数据信息,使研究者和决策者能够精准把握院落内水、能源、废物等资源的使用情况,进而针对不同地区居民居住习惯、地理文化背景与发展需求因地制宜制定针对性措施,为实现更加符合地方实际的可持续发展目标提供了具体的可实施路径。例如,通过小尺度资源代谢评估,可以明确哪些资源存在循环利用的潜力,探索循环经济的可实施路径,促进经济与环境的双重效益;对院落开展微热岛效应评估与改善,不仅能够增强居住环境的舒适性,更能有

效减缓其对区域气候变化的影响,从而增强院落的可持续性;对院落开展评估时与居民的交流过程能够促使院落居民的资源管理意识与环境保护责任感得到提升,社区凝聚力增强,从而更有利于后续管理工作的开展等。此外,该评估模式的推广还能在未来有效减少社会发展二元化与不平等现象,揭示院落内部或不同院落之间的资源分配不均等问题,识别发展落后区域并有针对性地进行帮扶,从而促进资源获取和分配的公平性。因此,院落小尺度资源代谢评估不仅是提升资源管理效率的重要工具,更是实现社会经济与生态文明可持续发展的坚实基础,既能为乡村发展提供更为精准与有效的指导,又能推动人与自然和谐共生。

4.3 展望

在资源代谢视角下,中国未来乡村院落资源整合将更加关注生态循环、资源复用与产业多样化,同时考虑到乡村居民的多层次需求,未来院落设计应兼具生态、经济、社会和文化功能,提升资源空间与居民需求的适配性。本文提出的系统化院落资源代谢分析,有助于识别区域内资源的最优分配路径,使得资源配置、生态效益、经济效益、社会效益与居民情绪效益均能够被最大化实现。未来通过对院落全景资源流动模型和资源代谢评价体系的进一步完善及应用实践,将能精确评估资源在院落内的中微观流动规律,为政府、研究机构和基层组织在乡村振兴政策的实施过程中提供新的决策工具和科学评估依据。此外,乡村院落空间层面上属于“微地理—经济—社会—产业”的一体化系统,因而在规划上还需综合考虑院落内外的资源流通,构建复合型院落经济,避免单一化发展。通过政策引导,未来乡村院落将实现资源、资金和产业的耦合互动,进一步推动乡村经济可持续发展。

参考文献(References)

[1] 段义孚. 恋地情结 [M]. 志丞, 刘苏, 译. 北京: 商务印书馆, 2018. [Tuan Yifu. *Topophilia: A study of environmental perception, attitudes and values*. Translated by Zhi Cheng, Liu Su. Beijing, China: The Commercial Press, 2018.]

[2] 夏金山, 王瑗玲, 陈欣玉, 等. 山东省农村院落功能及其演变研究 [J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(S1): 460-463. [Xia Jinshan, Wang Ailing, Chen Xinyu, et al. Research on the function and evolution of rural courtyard in Shandong Province. *China Population, Resources and En-*

vironment, 2016, 26(S1): 460-463.]

[3] 孔宇航, 韩宇星. 中国传统民居院落的分析与继承 [J]. 大连理工大学学报(社会科学版), 2003, 24(4): 92-96. [Kong Yuhang, Han Yuxing. Analysis and inheritance of Chinese traditional residents' courtyards. *Journal of Dalian University of Technology (Social Sciences)*, 2003, 24(4): 92-96.]

[4] 吴良镛. 人居环境科学导论 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001. [Wu Liangyong. *Introduction to Sciences of human settlements*. Beijing, China: China Architecture & Building Press, 2001.]

[5] Hu Q Y, Wang C. Quality evaluation and division of regional types of rural human settlements in China [J]. *Habitat International*, 2020, 105: 102278. doi: 10.1016/j.habitatint.2020.102278.

[6] 杨阳, 房艳刚, 梁璐. 人文地理方法论视角下的乡村聚落景观流派进展及展望 [J]. 地理科学进展, 2024, 43(1): 163-178. [Yang Yang, Fang Yangang, Liang Lu. Progress and prospects of rural settlement landscape research from the perspective of human geography methodology. *Progress in Geography*, 2024, 43(1): 163-178.]

[7] 袁明宝, 朱启臻. 城镇化背景下农村院落的价值和功能探析 [J]. 民俗研究, 2013(6): 121-126. [Yuan Mingbao, Zhu Qizhen. An exploration of the value and function of rural courtyards under the urbanisation. *Folklore Studies*, 2013(6): 121-126.]

[8] 董晓, 刘加平. 秦岭山地传统民居院落地域适应性及传承研究 [J]. 建筑科学, 2022, 38(6): 79-87, 96. [Dong Xiao, Liu Jiaping. Research on regional adaptability and inheritance of traditional residential courtyards in Qinling Mountains. *Building Science*, 2022, 38(6): 79-87, 96.]

[9] 陶伟, 蒋伟, 何新. 平遥古城民居之门的形态变迁及其家的观念表征 [J]. 地理研究, 2014, 33(12): 2418-2426. [Tao Wei, Jiang Wei, He Xin. The morphological change of vernacular dwelling gate and conceptual representation of home: A case study of Pingyao. *Geographical Research*, 2014, 33(12): 2418-2426.]

[10] 朱文一. 关于“院”的本质及文化内涵的追问 [J]. 世界建筑, 1992(5): 60-66. [Zhu Wenyi. The essence of "courtyard" and its cultural connotation. *World Architecture*, 1992(5): 60-66.]

[11] 徐辉. 巴蜀传统民居院落空间研究框架 [J]. 建筑学报, 2011(S2): 148-151. [Xu Hui. The research frame of Bashu traditional dwellings' courtyard spaces. *Architectural Journal*, 2011(S2): 148-151.]

[12] 孟宝, 彭立, 张少尧, 等. 川南山地丘陵区乡村院落空间演变及优化 [J]. 农业工程学报, 2019, 35(17): 274-284. [Meng Bao, Peng Li, Zhang Shaoyao, et al. Spatial evolu-

- tion and optimization of rural yard in low mountain area in southern Sichuan. *Transactions of the CSAE*, 2019, 35(17): 274-284.]
- [13] 龙彬, 董楚森, 陈秋渝, 等. 重庆近现代地域建筑发展研究: 以院落空间模式的演变发展为例 [J]. *南方建筑*, 2023(11): 79-88. [Long Bin, Dong Chumiao, Chen Qiuyu, et al. Development of modern regional architecture in Chongqing: A case study of courtyard spatial pattern evolution. *South Architecture*, 2023(11): 79-88.]
- [14] Bueno C F. Culture: Evolving origin, history and application in sociology and anthropology [M]// Bueno C F. Culture: From primitive society to the space age. Charleston, USA: CreateSpace Independent Publishing Platform, 2013: 6-10.
- [15] Tan B, Wang H W, Wang X Q, et al. The study of early human settlement preference and settlement prediction in Xinjiang, China [J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 5072. doi: 10.1038/s41598-022-09033-y.
- [16] Blunt A, Dowling R. Home [M]. London, UK: Routledge, 2006.
- [17] Wang P, Xie S Y, Xu H G. Re-conceptualizing the ideal homes in rural China: An actor-network theory approach [J]. *Humanities and Social Sciences Communications*, 2023, 10: 513. doi: 10.1057/s41599-023-02017-x.
- [18] 郭晓胜, 窦文章. “院落空间”的居住文化探析与社区规划思考 [J]. *建筑与文化*, 2022(8): 189-191. [Guo Xiaosheng, Dou Wenzhang. Analysis and think about residential culture and community planning of "courtyard space". *Architecture & Culture*, 2022(8): 189-191.]
- [19] 冯应斌, 杨庆媛. 农户宅基地演变过程及其调控研究进展 [J]. *资源科学*, 2015, 37(3): 442-448. [Feng Yingbin, Yang Qingyuan. A review of research on the rural homestead evolution process and its regulation. *Resources Science*, 2015, 37(3): 442-448.]
- [20] 师荣光, 武文豪, 汪常乐, 等. 绿色发展视角下乡村生态环境规划的几点思考 [J]. *农业资源与环境学报*, 2023, 40(5): 989-996. [Shi Rongguang, Wu Wenhao, Wang Changle, et al. Reflections on rural environmental planning from the perspective of green development. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(5): 989-996.]
- [21] 孔凡斌, 徐彩瑶. 生态共富的理论逻辑与乡村实践路径 [J]. *管理学报*, 2023, 36(3): 132-148. [Kong Fanbin, Xu Caiyao. Theoretical logic and rural practice path of ecological common wealth. *Journal of Management*, 2023, 36(3): 132-148.]
- [22] 王英, 陈文江, 张咏梅, 等. 西北农村社区服务是以居民的需求为本吗? 基于西北 18 个农村社区的个案考察 [J]. *兰州大学学报(社会科学版)*, 2016, 44(1): 119-127. [Wang Ying, Chen Wenjiang, Zhang Yongmei, et al. Is the community service in northwestern rural areas oriented towards the needs of local residents? A survey based on 18 rural communities. *Journal of Lanzhou University (Social Sciences)*, 2016, 44(1): 119-127.]
- [23] 李树苗, 徐洁, 左冬梅, 等. 农村老年人的生计、福祉与家庭支持政策: 一个可持续生计分析框架 [J]. *当代经济科学*, 2017, 39(4): 1-10, 124. [Li Shuzhuo, Xu Jie, Zuo Dongmei, et al. Livelihood and wellbeing of rural elderly and family support policy: A sustainable livelihood framework. *Modern Economic Science*, 2017, 39(4): 1-10, 124.]
- [24] 刘春芳, 张志英. 从城乡一体化到城乡融合: 新型城乡关系的思考 [J]. *地理科学*, 2018, 38(10): 1624-1633. [Liu Chunfang, Zhang Zhiying. From town-country integration to urban-rural integration: New thinking on the relationship between urban and rural areas. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(10): 1624-1633.]
- [25] 陆元鼎. 中国民居研究五十年 [J]. *建筑学报*, 2007(11): 66-69. [Lu Yuanding. 50 years' researches on Chinese folk house. *Architectural Journal*, 2007(11): 66-69.]
- [26] 黄海静, 董张. 岷沙苗族聚落及村寨建筑的地域适应性特征 [J]. *西部人居环境学刊*, 2019, 34(1): 111-118. [Huang Haijing, Dong Zhang. The regional adaptability characteristics of Miao settlement and village architecture in Basha. *Journal of Human Settlements in West China*, 2019, 34(1): 111-118.]
- [27] 何泉, 王文超, 刘加平, 等. 基于 Climate Consultant 的拉萨传统民居气候适应性分析 [J]. *建筑科学*, 2017, 33(4): 94-100. [He Quan, Wang Wenchao, Liu Jiaping, et al. Climatic adaptation analysis of vernacular houses of Lhasa by Climate Consultant. *Building Science*, 2017, 33(4): 94-100.]
- [28] 张曼, 曹雪萦, 汤羽扬. 北京西西北历史文化街区平房院落能源性能综合研究 [J]. *西部人居环境学刊*, 2024, 39(2): 98-104. [Zhang Man, Cao Xueying, Tang Yuyang. Comprehensive study on the energy performance of cottage courtyards in Beijing's Xisibei historical and cultural districts. *Journal of Human Settlements in West China*, 2024, 39(2): 98-104.]
- [29] 唐丽, 栾景阳, 刘若瀚. 河南豫北地区合院式传统民居节能技术初探 [J]. *建筑科学*, 2012, 28(6): 10-13, 23. [Tang Li, Luan Jingyang, Liu Ruohan. Discussion on energy-saving technologies of traditional courtyard dwellings in northern Henan. *Building Science*, 2012, 28(6): 10-13, 23.]
- [30] 庞璐, 韩卫然, 严少飞. 晋陕传统合院民居光环境研究:

- 以两处民居室内采光为例 [J]. 西安建筑科技大学学报 (自然科学版), 2022, 54(5): 701-709. [Pang Lu, Han Weiran, Yan Shaofei. Study on the light environment of traditional courtyard dwellings in Shanxi and Shaanxi. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2022, 54(5): 701-709.]
- [31] 李世芬, 董惟澈, 刘代云, 等. 基于冬季室外风环境模拟的东北乡村住居优化设计研究 [J]. 西部人居环境学刊, 2022, 37(1): 139-146. [Li Shifen, Dong Weiche, Liu Daiyun, et al. Study on optimization design of rural residence in Northeast China based on outdoor wind environment simulation in winter. Journal of Human Settlements in West China, 2022, 37(1): 139-146.]
- [32] 王天艺. 芦山崩遗址与“西土类”院落建筑体系的形成 [J]. 考古, 2021(4): 89-102. [Wang Tianyi. Lushanmao site and the formation of the "western land type" courtyard architectural system. Archaeology, 2021(4): 89-102.]
- [33] 汪德根, 吕庆月, 吴永发, 等. 中国传统民居建筑风貌地域分异特征与形成机理 [J]. 自然资源学报, 2019, 34(9): 1864-1885. [Wang Degen, Lyu Qingyue, Wu Yongfa, et al. The characteristic of regional differentiation and impact mechanism of architecture style of traditional residence. Journal of Natural Resources, 2019, 34(9): 1864-1885.]
- [34] 翟洲燕, 李同昇, 常芳, 等. 陕西传统村落文化遗产景观基因识别 [J]. 地理科学进展, 2017, 36(9): 1067-1080. [Zhai Zhouyan, Li Tongsheng, Chang Fang, et al. Genes identification of cultural heritage landscape of Shaanxi traditional villages. Progress in Geography, 2017, 36(9): 1067-1080.]
- [35] 慕云舒. 基于空间设计的民居建筑活态保护与文旅融合发展研究 [J]. 建筑科学, 2024, 40(3): 176. [Mu Yunshu. Research on the living conservation of residential buildings and the integrated development of culture and tourism based on spatial design. Building Science, 2024, 40(3): 176.]
- [36] 史艳荣, 谢彦君, 曾诗晴. 疏离感与亲和力: 乡村旅游体验中的院落情结与人际关系再造 [J]. 旅游学刊, 2020, 35(12): 63-80. [Shi Yanrong, Xie Yanjun, Zeng Shiqing. Estrangement and affinity: Reconstruction of interpersonal relationship and courtyard complex in rural tourist experience. Tourism Tribune, 2020, 35(12): 63-80.]
- [37] 董丹丹. 传统农家院落旅游开发过程中人文场景建设的影响因素分析 [J]. 农业经济, 2021(2): 57-59. [Dong Dandan. Analysis of the influencing factors of humanistic scene construction in the process of traditional farmhouse tourism development. Agricultural Economy, 2021(2): 57-59.]
- [38] 朱志航, 马利邦, 宗艳玲, 等. 主客观比较视角下农户福祉差异与提升路径研究 [J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2024, 42(2): 39-52, 134. [Zhu Zhihang, Ma Libang, Zong Yanling, et al. Research on differences in farmers' well-being and enhancement paths from subjective and objective perspective. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences), 2024, 42(2): 39-52, 134.]
- [39] 吕天宇, 赵微, 李娜, 等. 基于农民满意度的农村水环境治理绩效研究: 以湖北省部分县市的调查为例 [J]. 水土保持通报, 2020, 40(6): 137-145, 152. [Lv Tianyu, Zhao Wei, Li Na, et al. A study on rural water environment governance based on farmer's satisfaction: Taking some counties of Hubei Province as study areas. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(6): 137-145, 152.]
- [40] 张娟, 王茂军. 北京市典型乡村居住空间分化研究: 以莲花池村为例 [J]. 城市发展研究, 2020, 27(6): 35-42. [Zhang Juan, Wang Maojun. Study on the differentiation of typical rural residential space in Beijing: A case study of Lianhuachi Village. Urban Development Studies, 2020, 27(6): 35-42.]
- [41] Wang M J, Xu W Y, Cao G Z, et al. Identification of rural courtyards' utilization status using deep learning and machine learning methods on unmanned aerial vehicle images in north China [J]. Building Simulation, 2024, 17: 799-818.
- [42] 袁青, 王翼飞. 基于价值提升的严寒地区村镇庭院优化策略 [J]. 城市规划学刊, 2015(1): 68-74. [Yuan Qing, Wang Yifei. Study on optimized strategies of rural yard in severe cold region based on value promotion. Urban Planning Forum, 2015(1): 68-74.]
- [43] Wu R Z, Fang X S, Brown R, et al. Establishing a link between complex courtyard spaces and thermal comfort: A major advancement in evidence-based design [J]. Building and Environment, 2023, 245: 110852. doi: 10.1016/j.buildenv.2023.110852.
- [44] 陶伟, 陈红叶, 林杰勇. 句法视角下广州传统村落空间形态及认知研究 [J]. 地理学报, 2013, 68(2): 209-218. [Tao Wei, Chen Hongye, Lin Jieyong. Spatial form and spatial cognition of traditional village in syntactical view: A case study of Xiaozhou Village, Guangzhou. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(2): 209-218.]
- [45] 张宸铭, 高建华, 李国梁. 基于空间句法的河南省传统民居分析及其地域文化解读 [J]. 经济地理, 2016, 36(7): 190-195. [Zhang Chenming, Gao Jianhua, Li Guoliang. Traditional settlement and regional culture of Henan

- Province based on space syntax. *Economic Geography*, 2016, 36(7): 190-195.]
- [46] 梁文举, 郭秀银, 杨玉兰, 等. 北方庭院生态系统能量分析及养分平衡研究 [J]. *自然资源学报*, 1998, 13(1): 28-33. [Liang Wenju, Guo Xiuyin, Yang Yulan, et al. A study of the energy analysis and nutrient balance of the courtyard ecosystem in northern China. *Journal of Natural Resources*, 1998, 13(1): 28-33.]
- [47] 周忠凯, 杨锐, 郝欣然, 等. 资源代谢视角下乡村空间优化设计路径和策略研究: 以淄博西单村为例 [J]. *现代城市研究*, 2023, 38(8): 50-58. [Zhou Zhongkai, Yang Rui, Hao Xinran, et al. Research on the optimal design path and strategy of rural space from the metabolism perspective: A case study of Xishan Village, Zibo City. *Modern Urban Research*, 2023, 38(8): 50-58.]
- [48] 周忠凯, 杨霄, 赵继龙. 资源代谢理论及其影响下的乡村住区设计和实践 [J]. *建筑师*, 2021(5): 75-83. [Zhou Zhongkai, Yang Xiao, Zhao Jilong. The rural settlements design and practice under the resource metabolism theory and its influence. *The Architect*, 2021(5): 75-83.]
- [49] 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. [Zhou Chuanbin, Chen Hao, Zhang Fushen. Courtyard ecological engineering for the cold and arid rural areas to alleviate poverty and improve environmental quality. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2022, 16(9): 3125-3133.]
- [50] Zheng N N, Wang S C, Wang H Y, et al. Rural settlement of urban dwellers in China: Community integration and spatial restructuring [J]. *Humanities and Social Sciences Communications*, 2024(11): 188. doi: 10.1057/s41599-024-02680-8.
- [51] 李佳洋. 以环境心理学视角探索中国当代居住空间防卫性设计 [D]. 沈阳: 鲁迅美术学院, 2022. [Li Jiayang. Exploring the defensive design of contemporary Chinese residential spaces from the perspective of environmental psychology. Shenyang, China: Luxun Academy of Fine Arts, 2022.]
- [52] 杨清, 赵秀敏, 石坚韧. 浙江省村镇院落空间的演变与转型趋势研究 [J]. *小城镇建设*, 2019, 37(1): 38-47. [Yang Qing, Zhao Xiumin, Shi Jianren. Research on the evolution and transition trend of village courtyard space in Zhejiang. *Development of Small Cities & Towns*, 2019, 37(1): 38-47.]
- [53] 赵燕. 中国传统民居中蕴含的理想家园意识探讨 [J]. *中国园林*, 2017, 33(5): 46-49. [Zhao Yan. Study on the ideal homeland consciousness contained in Chinese traditional residence. *Chinese Landscape Architecture*, 2017, 33(5): 46-49.]
- [54] 胡斯威, 王永生, 曹智. 乡村人地系统耦合研究进展与展望 [J]. *地理科学进展*, 2023, 42(12): 2439-2452. [Hu Siwei, Wang Yongsheng, Cao Zhi. Progress and prospects of rural human-earth system coupling research. *Progress in Geography*, 2023, 42(12): 2439-2452.]
- [55] 生态环境部. 以美丽中国建设全面推进人与自然和谐共生的现代化 [J]. *求是*, 2023(15): 53-59. [Ministry of Ecology and Environment. Building a beautiful China to comprehensively promote the modernization of harmonious coexistence between man and nature. *Qiushi*, 2023 (15): 53-59.]
- [56] 单春林. 基于马斯洛需求层次理论的激励路径实践 [J]. *电子技术*, 2020, 49(9): 124-125. [Shan Chunlin. Practice of incentive path based on Maslow's hierarchy of needs theory. *Electronic Technology*, 2020, 49(9): 124-125.]
- [57] 董运生. 演变与重塑: 中国农民生活空间的变迁 [J]. *江苏社会科学*, 2018(6): 43-49. [Dong Yunsheng. Evolution and remodelling: Changes in Chinese peasants' living space. *Jiangsu Social Sciences*, 2018(6): 43-49.]
- [58] 卓蓉蓉, 杨丽霞, 徐萌, 等. 乡村生活空间的概念模型与转型研究框架 [J]. *自然资源学报*, 2023, 38(10): 2554-2568. [Zhuo Rongrong, Yang Lixia, Xu Meng, et al. Conceptual model of rural life space and transformation research framework. *Journal of Natural Resources*, 2023, 38(10): 2554-2568.]
- [59] 黄和平, 毕军, 张炳, 等. 物质流分析研究述评 [J]. *生态学报*, 2007, 27(1): 368-379. [Huang Heping, Bi Jun, Zhang Bing, et al. A critical review of material flow analysis (MFA). *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(1): 368-379.]
- [60] 宋涛, 蔡建明, 倪攀, 等. 城市新陈代谢研究综述及展望 [J]. *地理科学进展*, 2013, 32(11): 1650-1661. [Song Tao, Cai Jianming, Ni Pan, et al. Review and prospects of urban metabolism research. *Progress in Geography*, 2013, 32(11): 1650-1661.]
- [61] 张宇鑫, 李宏庆, 杨铮, 等. 乡村家庭尺度全景碳流模型构建及实证 [J]. *农业资源与环境学报*, 2024, 41(5): 1133-1143. [Zhang Yuxin, Li Hongqing, Yang Zheng, et al. Construction and empirical evidence of panoramic carbon flow model at rural household scale. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2024, 41(5): 1133-1143.]
- [62] 薛冰, 李宏庆, 黄蓓佳, 等. 数据驱动的社会—经济—自然复合生态系统研究: 尺度、过程及其决策关联 [J]. *应用生态学报*, 2022, 33(12): 3169-3176. [Xue Bing, Li Hongqing, Huang Beijia, et al. Data-driven study of com-

- plex socio-economic-natural ecosystems: Scales, processes and decision linkages. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(12): 3169-3176.]
- [63] 谭雪萍, 耿涌, 宋晓倩, 等. 构建面向碳中和目标的物质流分析研究框架: 基于文献计量视角 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2023, 33(12): 145-158. [Tan Xueping, Geng Yong, Song Xiaolian, et al. Constructing a research framework for material flow analysis towards carbon neutrality: A bibliometric perspective. *China Population, Resources and Environment*, 2023, 33(12): 145-158.]
- [64] 王达蕴, 肖妮, 肖序. 资源价值流会计标准化研究 [J]. *会计研究*, 2017(9): 12-19, 96. [Wang Dayun, Xiao Ni, Xiao Xu. The research on standardization of resource value flow accounting. *Accounting Research*, 2017(9): 12-19, 96.]
- [65] 施晓清, 杨建新, 王如松, 等. 产业生态系统资源代谢分析方法 [J]. *生态学报*, 2012, 32(7): 2012-2024. [Shi Xiaqing, Yang Jianxin, Wang Rusong, et al. An approach for analyzing resources metabolism of industrial ecosystems. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(7): 2012-2024.]
- [66] Padovan D, Martini F, Cerutti A K. Social practices of ordinary consumption: An introduction to household metabolism [J]. *Journal of Socialomics*, 2015, 4(2): 1000119. doi: 10.4172/2167-0358.1000119.
- [67] Noorman K J, Uiterkamp T S. Green households: Domestic consumers, environment, and sustainability [M]. London, UK: Earthscan Publications Ltd., 1998: 26-27.
- [68] 侯鹏, 刘刚, 刘晓洁, 等. 产业生态学视角下的家庭代谢: 理论框架、进展与展望 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2020, 30(12): 193-204. [Hou Peng, Liu Gang, Liu Xiaojie, et al. Household metabolism research from an industrial ecology perspective: Framework, progress and prospects. *China Population, Resources and Environment*, 2020, 30(12): 193-204.]
- [69] 杨雨莹, 任晓芬, 张景, 等. 基于改进 AHP-TOPSIS 的村镇太阳能+生物质能联合供暖综合评价 [J]. *太阳能学报*, 2024, 45(2): 342-350. [Yang Yuying, Ren Xiaofen, Zhang Jing, et al. Comprehensive evaluation of combined solar+biomass heating in villages and towns based on improved AHP-TOPSIS. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2024, 45(2): 342-350.]
- [70] 杨雅君, 邹振东, 赵文利, 等. 6 种城市下垫面热环境效应对比研究 [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2017, 53(5): 881-889. [Yang Yajun, Zou Zhendong, Zhao Wenli, et al. Comparative study on the thermal environment effect of six urban underlying surfaces. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2017, 53(5): 881-889.]
- [71] 毛汉英. 人地系统优化调控的理论方法研究 [J]. *地理学报*, 2018, 73(4): 608-619. [Mao Hanying. Theories and methods of optimal control of human-earth system: Commemoration of 100th anniversary of academician Wu Chuanjun's birth. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(4): 608-619.]
- [72] Li X M, Liu H. The influence of subjective and objective characteristics of urban human settlements on residents' life satisfaction in China [J]. *Land*, 2021, 10(12): 1400. doi: 10.3390/land10121400.

Research framework and scientific basis for resource metabolism in rural courtyards

XUE Bing¹, XU Yaotian^{1,2}, LI Hongqing³, ZHANG Yuxin^{4,5}, REN Wanxia¹

(1. Institute of Applied Ecology, CAS, Shenyang 110016, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Chair of Circular Economy and Recycle Technology, Technical University of Berlin, Berlin 10623, Germany; 4. College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250358, China; 5. Weifang Institute of Modern Agriculture and Ecological Environment, Weifang 261071, Shandong, China)

Abstract: The integrated consolidation of resources within human-environment systems can effectively promote the scientific establishment of resource spatial configurations in courtyards, facilitating regional ecological and economic development. With the intensification of population aging and decline, China, as a large traditional agricultural country, is likely to see most rural living spaces returning to traditional courtyard-style structures in the future. Therefore, based on Maslow's hierarchy of needs theory and the resource metabolism theory, we explored the development scenarios of rural courtyards in China in the future. We also applied the resource metabolism analytical framework with the fundamental characteristics of the micro-geographical, economic, social, and industrial systems of courtyards, systematically analyzing the spatial configuration and flow patterns of courtyard resources. By comprehensively considering the multi-level needs of rural residents in the future, we established a conceptual model of courtyard resource spatial evolution based on an improved version of Maslow's theory, a panoramic resource flow model for courtyards under spatial compound structures, an evaluation indicator system of courtyard resource metabolism, and a future-oriented research framework for resource metabolism in rural courtyards, which systematically elucidated the scientific relationship between courtyard resource metabolism research and spatial function and regional policy. We innovatively put forward the scientific basis and research framework of resource metabolism with independent courtyards as the research object, evaluated the flow pattern of resources in the courtyard from the micro-scale, which is helpful for accurately identifying the optimal allocation path of resources in the region, so that the allocation of resources, ecological benefits, economic benefits, social benefits, and residents' emotional benefits can be maximized. It provides a scientific support for the global integration and diversified value-added of courtyard resources, provides an efficient guidance for the development decision making of rural areas, and promotes the sustainable development of rural human settlements.

Keywords: rural courtyards; resident needs; resource metabolism; evaluation indicators; human-environment systems