资源代谢理论及其影响下的乡村住区设计和实践

The Rural Settlements Design and Practice Under the Resource Metabolism Theory and Its Influence

周忠凯 | ZHOU Zhongkai 杨 霄 | YANG Xiao 赵继龙 | ZHAO Jilong

摘要：从资源代谢系统观点出发，探索乡村资源高效、循环利用方式及乡村住区空间优化设计方法，是实现乡村转型的重要措施。在阐明乡村资源代谢的内涵属性与空间特征、资源代谢系统与乡村住区空间互动机制的基础上，从连接生产生活系统的资源利用、基于资源代谢机理的空间操作、"空间、技术、社会"三位一体三个方面，提出适应资源代谢机制的乡村住区构建模式。解析依据资源互补实现功能空间布局的北京留民营生态村、整合生产生活系统的陕西石家村"四季房子"、融合水循环代谢流动的广东莲麻村公共空间更新三个典型案例，探索融入资源代谢理念的乡村住区空间优化设计操作方式。以期对推动中国乡村人居环境良性发展、促进乡村空间转型及拓宽乡建设计思路提供有益启示。

关键词：乡村住区、资源代谢、资源高效利用、三生一体[1]、空间优化设计

Abstract: Starting from the systematic point of resource metabolism, exploring the efficient and circular use of rural resources and the method of rural settlement spatial optimal design, are important way to realize rural transformation. By clarifying the connotative attributes and spatial features of the rural resource metabolism, as well as the interactive mechanism between resource metabolism system and rural settlement, from the aspects of the resource utilization based on connecting production and living systems, the spatial operation based on the mechanism of resource metabolism, trinity of "space, technology, society", a rural settlement construction model that adapts to the mechanism of resource metabolism is proposed. Analyzing three typical cases of Beijing Liuminying Ecological Village based on resource complementation to achieve functional spatial layout, "Four-Season House" in Shanxi Shijia Village integrating production and living systems, and the public space renewal in Guangdong Lianma Village integrating water circulation, the optimal design and operation mode for rural residential space with integrating resource metabolism is explored. It hopes to offer the enlightenment for the development of rural settlement, the rural spatial transformation as well as the rural construction.

Keywords: Rural Settlements, Resource Metabolism, Efficient Use of Resource, Trinity of Production, Life, Ecology, Spatial Optimal Design

作者：
周忠凯，天津大学建筑学院博士研究生在读，山东建筑大学建筑城规学院讲师；
杨霄，山东建筑大学建筑城规学院硕士研究生；
赵继龙（通讯作者），山东建筑大学建筑城规学院教授，博士生导师。
国家自然科学基金资助项目（51778349）；教育部人文社会科学研究青年基金项目（20YJCZH252）；山东省自然科学基金项目（ZR2019PEE037）；山东省专业学位研究生教学案例库项目（SDYAL20160）。

DOI：10.12285/jzs.20201219001

当前乡村日趋单向线性的资源使用以及土地利用方式、非生态性消费模式的传导，快速提高了乡村人均及总体资源消耗水平，对中国乡村地区的生态环境构成严重挑战。结合多年来在山东地区乡村开展的大量实地调研和实践认知，笔者发现当前乡村人居环境建设普遍轻视乡村生态系统内在的资源要素的流动规律、合理配置和高效利用，忽视与乡村生产、生活方式及空间要素的有机结合，导致乡村空间营建模式雷同化和类城市化、土地供需矛盾日益尖锐、生态承载力降低等诸多问题。如何从构成乡村人居环境的资源要素流动过程和作用规律出发，探索一条适宜乡村资源条件和社会结构特征的空间营建模式，实现乡村资源高效利用及其与空间要素的系统整合，提高乡村弹性与资源安全性，是乡村人居空间转型发展的重要命题。

城乡人居空间作为多个学科领域的共同研究对象，已出现若干研究视角和研究方法，源于生态学、以资源高效利用为目标的资源代谢研究，逐渐成为解决人居环境可持续发展问题的重要分析工具和建构手段。但由于学科差异，相关领域研究早期阶段较少跨越学科边界去深入关注人居环境的建设问题。而近年来基于学科交叉视角，以资源代谢流动定量分析为主要方法，致力于探索资源高效利用与人居空间一体化的“城市代谢”理论，打开了一个系统审视人居环境与自然环境深层关系的全新视角，可有效启发乡村住区的空间问题研究。论文以资源代谢原理为透镜，系统解析近年来关联资源代谢与乡村住区空间的相关理论成果，通过分析资源代谢理念融入生态乡村住区空间布局、村居建筑单体营建及村庄公共空间更新三个代表性实践案例，深入探析适应乡村人居环境特征、整合“空间、技术、社会”要素的乡村住区资源利用模式和空间布局优化方式，这对于乡村住区空间可持续发展的规律认知和实践进步具有普遍的理论价值和现实意义。

一、乡村资源代谢的内涵属性与空间特征

资源代谢早期以城市为研究对象，美国生态学家沃尔曼（Abel Wolman）最早提出“城市代谢”（Urban Metabolism）概念，并将其定义为城市输入物质、能量，并输出产品、废物，以维持自身运行的过程。如今，资源代谢理论已涉及宏观区域至微观街区的各个尺度层面，从代谢视角出发，将物质和能量的流动使用状况（流向、流量、积累、转化效率等）作为评价人居生态系统建设的核心指标，而各类资源要素的就地循环再利用，是实现生态多样性和代谢效率提升的关键。相关研究方法也从运用物质和能量常规计量单位分析资源代谢过程中投入和产出的物质核算法，逐渐完善发展为以质量通量表达资源存储和流动状况的物质流分析法（Material Flow Analysis）为代表，并在与空间结合分析方面不断深入。

重视资源的综合利用和循环利用是乡村的本位理念和自然选择，这种朴素理念的自发探索和实践很早就出现于人类传统生态智慧中，并延续至今，与当前倡导的循环代谢具有内在和本质的一致性。早在中国农耕社会时代，先人们在自给自足小农经济模式下进行资源循环管理和集约化土地利用，积累了大量的生产、生活、生态一体化智慧。中华人民共和国成立后的几十年间，乡村地区在经济困顿的情况下大力发展庭院经济、家庭沼气制备、四位一体设施农业，涌现出以北京留民营村为代表的大批生态乡村建设实例，积累了宝贵经验。这些有益的历史经验，应该在新时期乡村建设过程中予以珍视及合理传承。

从资源代谢的系统观出发，乡村人居空间可被视作进行新陈代谢的有机体，其实质是各种资源流和能量流交织组构的生态系统和空间单元，融入代谢思维意味着将资源管理与乡村空间设计营建协同整合。乡村住区空间可持续设计研究的实质是探索乡村各类资源在适当空间系统支持下实现高效利用的方式，而以资源要素流动过程和效率为焦点的代谢研究是更加直接和接近本质的视角方法，可从更深层次揭示乡村人居环境的动态变化机制，有效推动乡村空间的理性发展和科学更新。

从乡村自身的空间属性及其系统结构特征审视，乡村社区的系统边界、尺度规模和构成特征更易于构建较理想的资源代谢系统。一方面，与城市复杂的空间层级、宏大的规模尺度和多样的要素类型相比，乡村住区生态系统结构相对简单，尺度较小，生产、生态、生活要素齐备，且生物质和养分在资源流类型中占据主导比例，具备构建资源循环的基础和路径，是天然具有“三生一体”特征的人居空间单元[1]。另一方面，乡村环境对农业具有强烈依生性，农业在乡村经济、环境和社会文化各层面中扮演关键角色，不仅生产食物，还可以提供生物质能源，消纳有机垃圾转化为再生资源，是乡村生态系统资源代谢的核心环节，依托农业构建的“生产、生态、生活”一体化的人居单元，乡村更有可能趋近“生产——消耗——循环再利用”的在地资源循环，可在多尺度协同作用下实现生态平衡，形成符合自身特征并区别于城市的资源利用方式和空间营建模式。此外，不同于城市环境中各类功能用地界限明确、形态差异显著等特征，乡村的农业生产空间、生活及生态空间之间的边界模糊，彼此存在多方面的互补共生和融合渗透，具有强烈的功能耦合特征，例如种植生产空间也具有生态职能，且常与生活空间相结合（图 1）。

图1：乡村生产、生活、生态空间边界模糊

二、适应资源代谢机制的乡村住区构建模式

乡村住区的环境和资源要素分散且丰富，社会结构相对松散，职能定位与城市互补，更需强调其资源代谢系统与功能空间的复合一体化。基于农业生态学理论提出的“生产、生活、生态”三生一体的乡村人居空间发展模式，反映出以农业生产和资源就地利用为核心的乡村住区资源代谢系统与人居空间之间的内在关联性，可作为资源循环型乡村住区空间构建的指导原则。可持续乡村人居空间的组织协调，需要适应整合生产生活系统的资源利用技术体系，并兼顾乡村特殊的社会管理运行方式，实现技术、空间、社会要素的三位一体。

1. 连接生产生活系统的资源利用模式

乡村人居环境建设需要适应资源利用多样性、循环性和阶梯性特征，其资源代谢流动过程紧密整合生产和生活系统。欧美国家自1970年代出现的生态村建设，可以看作是乡村人居环境与资源代谢结合的初步尝试，其显著特点是在村内大量种植经济作物来充当绿化，将被动式太阳能、良好的步行环境、自然排水有机地整合成一个完整生态系统。之后在生态村模式基础上发展的“温室村”和“再生村”，基于农业生产设施与生活空间一体化理念，构建完整的生态村资源循环系统，将食物生产功能空间作为资源转化利用枢纽，与居住及公共空间系统相关联，实现资源的高效循环利用（图2）。以荷兰代尔夫特理工大学等高校为代表的研究机构，基于热力学的“有效能”（Exergy）概念，提出资源可持续利用的基本路径——消减外部资源的消耗和输入、循环利用资源废物流、最后使用可再生资源，强调资源品位的流动转化应与代谢过程中不同类型的活动需求相匹配，功能多样性和空间混合性对于水与养分的循环利用和能源的梯级利用至关重要。各类功能空间及场地设施需要彼此依托，对不同类型资源输入输出和利用模式的互动协作关系，最大化利用剩余资源流和闭合资源循环，以实现能源、水资源系统与各类功能空间布局的耦合关系建构。

与空间布局和形态特征相匹配，乡村住区以生态农业为组件、以生物质资源转化利用为核心，连通生产系统和生活系统，构建包含沼气、太阳能为主的能源产用及污水资源化利用的技术体系。空间组织方面，在村域范围内与公共服务建筑、村居院落、开放空间等不同尺度空间单元结合，可形成具有多样性、循环性和梯级性特征的资源利用模式。

图2：资源代谢系统与功能空间一体化的荷兰再生村

2. 基于资源代谢机理的空间操作模式

资源代谢理念探索各类资源要素在空间中的分布流动特征，及其与功能多样性和空间适应力之间的关系，以实现对空间资源的合理配置。乡村住区空间要素配置方式与农业资源利用特征密切相关，“空间——资源”一体化的关键在于遵循乡村资源系统的代谢运行规律，其空间操作模式具有以下特征。

2.1　自下而上逐级组构空间单元

资源代谢视角下的功能空间布局遵循物质循环和能量级联原则，与物质能量代谢规律和运行机制相适应，从微观空间层级介入、由小及大逐层实现资源循环产用，有效减少过程损耗，提升资源利用效率，并增强系统的环境适应性。在“鹿特丹能源策略和规划研究”中（REAP），设计者综合考虑资源在街区尺度内的交换、存储和转化过程，建立了与资源流流动过程相适应、自下而上逐级推进的空间操作模式，实现街区空间的资源供需平衡。通过空间干预自下而上关联各级空间单元，以优化资源代谢流动过程，启发了乡村住区资源代谢系统与空间要素的互动关系建构。

相较于城市环境中复杂的空间层级类型和组织模式，乡村住区系统包含建筑、团组邻里、村域空间三个空间层级，每个层级都具有相对完整的资源自我循环流动路径。将不同层级空间单元逐层嵌套，基于适宜的资源处理技术和成本投入，低层级未能处理的剩余资源可向上输出至高层级空间，在更大的范围内进行循环利用，如此往复迭代，最后仅向系统外部（村域外空间）输出难以消解的有限废弃物（图3）。

2.2　基于资源共享的空间邻近布局

空间位置的邻近性是实现功能空间协作、资源设施共享及产业发展协同的重要保障。资源的物理学特征影响不同资源处理设施的空间关系，如在热量交换和输配过程中，剩余热能常以热水为载体从发电站等设施输出，热量损失与输配距离成正比，此类资源的共享协作需要相关功能设

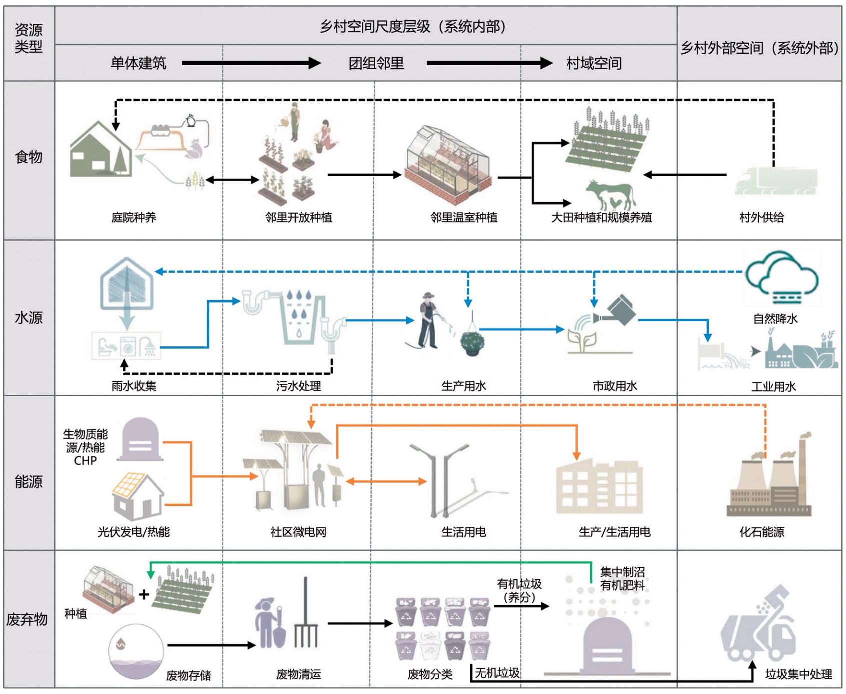

图3：与资源代谢相适应的自下而上逐层推进的空间操作模式

资源类型	资源处理设施类型		适宜尺度			资源处理技术设施与乡村空间形态元素的结合方式			
			单体	组团	村域	单体建筑	公共开放空间	道路	农田
能源	电能	太阳能板	●	●	●				
		风力发电	●	●	●				
	生物质能	沼气	●	●	●				
		秸秆气化	●	●	●				
	热能	热电联产	●	●	●				
		地热收集	●	●	●				
		太阳能集热系统	●	●	○				
水		地表水收集系统	●	●	●				
		屋顶水收集系统	○	●	○				
		蓄水系统	○	●	●				
食物	种植	温室	●	●	●				
		开放田地	●	●	●				
	养殖	养殖场	●	●	●				
废弃物	有机废弃物	沼气池	●	●	●				
		秸秆气化	●	●	●				

图4：资源处理设施与乡村空间要素的整合方式

施具有较好空间邻近性才能保证资源利用效率。

针对乡村环境，其空间布局邻近性涉及两个方面：一是村居及公共服务设施相对集中紧凑布局，利于节约用地、设施使用和邻里交流；二是针对乡村相对松散扁平化的空间特征和生物质资源丰富的特点，应采用“资源——空间”一体化模式，即资源处理技术设施与村庄各类生活和生产功能空间分布式整合，以减少资源输配的过程损耗。如沼气生产设施靠近需要沼气的村居庭院、温室大棚等场所，小型温室也可以植入村居庭院构建生态庭院系统，乡村住宅的坡屋顶安装太阳能热水装置提供生活热水或房屋采暖，中型太阳能光伏发电设施可与村庄闲置开放场地或邻近公共建筑设施（如村委会、超市等）结合，供照明等能源使用，实现资源就近利用和供需平衡（图4）。

2.3 资源设施与空间的分布式整合

乡村住区呈现以农田及自然地貌为生态本底，村落空间布点分散的特点，使得传统的城市集中式基础设施布局方式，无法匹配乡村不同空间要素的差异化需求，且在资源的输配、转换和存储过程中造成大量浪费，难以高效改善乡村住区环境（图5）。资源处理设施与空间要素的分布式整合，更利于提升资源利用效率和保持乡村风貌特色。借鉴发达国家在乡村规划及村居建设中广泛采用的分散式污水处理技术模式，在乡村社区和村居院落等尺度实行“源分离”生态排水策略及杂排水分散处理的操作方式，并将生态修复技术为核心的绿色基础设施与农村分散式村居形态相结合，可有效减少人力物力投入，取得较好的经济性和环境效益。部分学者以农村住宅单元为基础，基于庭院生态系统中以沼气为纽带的“四位一体”能源利用模式，提出对于村居庭院功能布局形式的优化策略及分散式农村庭院农业与景观一体化模式。由此可见，分布式能源及水资源利用及布局模式，可以更好地适应村庄空间特点，并且适配自下而上的乡村组织管理模式，利于运行维护。

3."空间、技术、社会"三位一体

构建具备资源循环代谢机能的生态乡村住区，应统筹宜居化空间形态、高效化资源利用技术和多元参与的社会组织运行方式，实现"空间、技术、社会"三维度要素的相互补强。空间重构意味着打破现今乡村中居住生活与农业生产的空间分离状态，在不同尺度重新建立起更为交融一体的新型空间组织方式，如村居庭院融入种养生产空间；技术重构意味着打破农业生产系统和农民生活系统的资源流动边界，依据系统间的资源互补共生关系，通过引入适宜的生态处理设施（绿色系统）和人工基础设施（灰色系统），组织各类物质的跨界流动循环；社会重构意味着生产组织方式、生活方式和就业方式突破以家庭为单位、以农业种养为主的模式，向社会化、产业化、多元化模式转变。技术和社会重构是空间重构的依据，空间重构是技术和社会重构的物质基础，技术重构是社会重构的重要前提，三者相互依存（图6）。

乡村住区中物质的生产、转化、输配、再利用的全过程，均与作为参与主体的农民发生密切关系，设计营建过程需尊重传统生态文化、村民知识技能水平、生产生活习惯及其主观适应性等制约因素，避免陷入"技术本位"陷阱。例如曾经作为可持续发展示范的辽宁省本溪市黄柏峪村，因其设计营建造过程与当地建筑文化、居住习俗脱节，忽视了本地化材料和建造传统，缺乏与当地村民的沟通互动和有效支持参与，致使建造的生态农房无人居住，最终产生了被动适应而难以持续的结果。

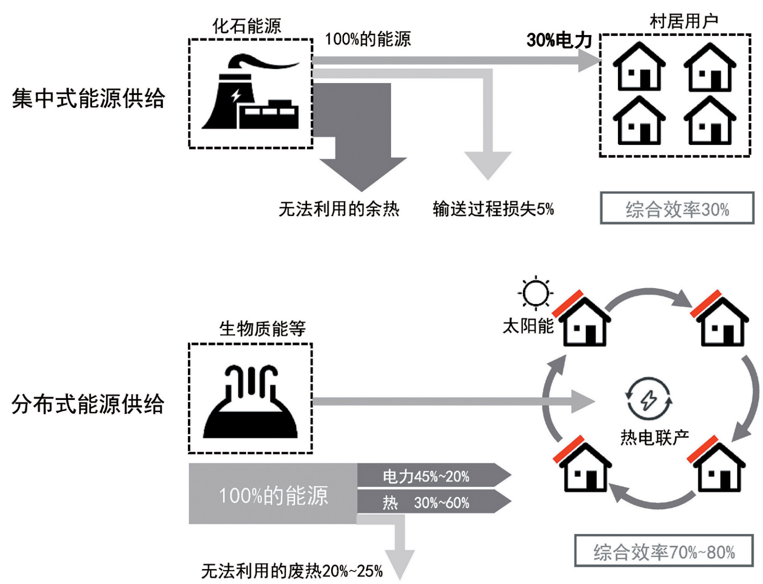

图5：分布式能源产用模式与集中式能源供给模式比对

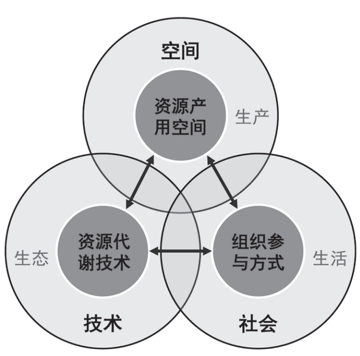

图6：空间、技术、社会三位一体

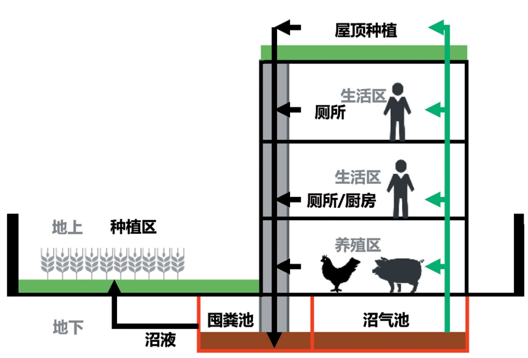

图7：金畈村立体生态农宅空间布局模式示意

当前中国生态乡村建设及其后期运行管理，具有"低技术、低投入"特征，不能简单搬用或模仿城市住区的基础设施系统，如依靠地埋管线连接的自动智能化有机废弃物收集储运设施或中小型沼、热、电联产设备等，以免出现后续运行维护困难以致废弃的情况。其次，资源代谢系统与乡村住区空间的一体化营建过程，综合村民生产生活习惯和交往方式，发展以沼气为纽带的庭院生态温室，可利用村民碎片化的农闲时间就近参与操作和管理，也可进一步拓展与温室采摘、养老农事体验等业态结合，实现更具韧性的乡村资源代谢系统。例如浙江永康市唐先镇金畈村的三层生态农宅，充分考虑到村民以庭院为主的日常生活作息特征，将沼气池、养殖棚舍、屋顶种植园与居住空间垂直整合，实现资源的循环流动和紧凑利用，也便于项目的后续维护管理（图7）。

三、基于资源代谢理念的乡村住区实践探索

基于资源代谢视角，村庄整体环境、开放空间、生态村居庭院、农业生产用地（大田或温室）都是资源转化的不同空间节点和重要组成部分，通过设计手段将资源代谢系统与乡村空间要素结合，可形成独具特色的空间及景观效果。近年来中国的乡建实践中，在村庄整体空间、村居单体和公共空间层面，涌现出一些以资源高效利用为目标、整合适宜生态技术与乡村空间要素的实验性探索。

1. 依据资源互补的功能空间布局——北京留民营生态村

留民营村位于北京大兴区，地处平原，交通便利，南邻河道，现有人口约900人（260户），土地约2200亩，包含村居、有机农业种植、生态畜禽养殖、加工产业等用地。以村域为系统边界，其构建了以沼气产用和水资源循环利用为中心，串联农、林、牧、渔多种产业的资源代谢系统，

并围绕村域和家庭两个系统层级，整合生产生活用地并指导村庄功能空间布局。

整体村域层面，生产生活功能空间围绕资源循环利用路径，实行邻近紧凑布局，主要以制备 $3000m^3$ 沼气和沼液、沼渣的村级沼气站为纽带，结合污水处理厂，串联农业生产空间（农田、温室菜园果园）、初级消费空间（村民、畜禽养殖、鱼塘）、加工产业空间（饲料加工、食品加工）三部分。村庄生产生活污水一部分混合人畜粪便后输入沼气站，另一部分经污水处理站处理后混合收集的雨水用于解决农业灌溉、牲畜养殖、冲厕等需求。与资源流流动过程和代谢机制相适应，综合考虑资源使用频率、物理属性、输配方式和成本等因素，沼气站与污水处理中心邻近设置，其他主要功能区也围绕其进行紧凑布局，便于各类有机废弃物和污水的转化利用。例如沼气需求旺盛的村居生活区（照明、做饭）、产业区（制热）和畜牧养殖区（采暖）紧邻沼气站和污水处理站，利于沼气和污水的收集和输配，减少过程损耗。温室农业种植区邻近产业加工区可利用其生产过程的余热，而农作物秸秆可用于生态养殖区的禽畜喂养（图 8，图 9）。

村居庭院层面，建立以家庭为基本单元的资源微循环系统，构建了混合生产生活功能、空间紧凑布局的立体生态庭院。围绕户均配建地下 $8m^3$ 沼气池，并与厕所及立体养殖空间直接联通，池上建小型温室用于种菜养花，养殖空间上层养鸡或兔、下层养猪。鸡粪或兔粪落入猪圈用作猪饲料，猪粪及厕所粪便流入地下沼气池，结合秸秆产生沼气用于屋内照明和做饭、沼气沼渣用于庭院温室施肥、温室的残余叶茎喂鸡和兔，形成了“养殖——庭院温室——沼气池”一体化庭院式资源循环利用空间系统（图 10）。

留民营作为早期生态乡村的典型代表，在村域和村居庭院两个尺度将功能、空间和资源循环系统整合，实现了生产、生活、生态的互补统一，并借助公司化运营与村民自治结合的管理模式，产生了良好的经济效益、生态效益和社会效益。

2. 整合生产生活系统的村居院落——陕西石家村“四季房子”

香港大学林君翰教授在陕西石家村设计建造的“四季房子”，将资源代谢理念融入村居建筑设计，于有限的单体建筑空间内整合了生产生活系统，在材料使用、建造工艺、资源循环与空间形态一体化等方面进行深入探索。

空间组织方面，考虑到庭院是村民日常生活、劳作和邻里社交的主要场所，参照当地合院住宅布局形制，围绕四个庭院组织不同使用方式的功能空间（图 11），包括晾晒衣物、农作物种植、牲畜养殖、沼气制备功能，既可独立使用，又与临近的客厅、卧室、厨房、厕所等房间在功能和视线上紧密联系（图 12）。材料使用与建造方面，设计师选用具有良好本地气候适应性和保温效果的胡基砖建造外墙（以红砖和黏土为基材），结合混凝土梁柱结构，形成融合新旧建造技术、满足抗震要求的混合型结构形式。造型别致的镂空花

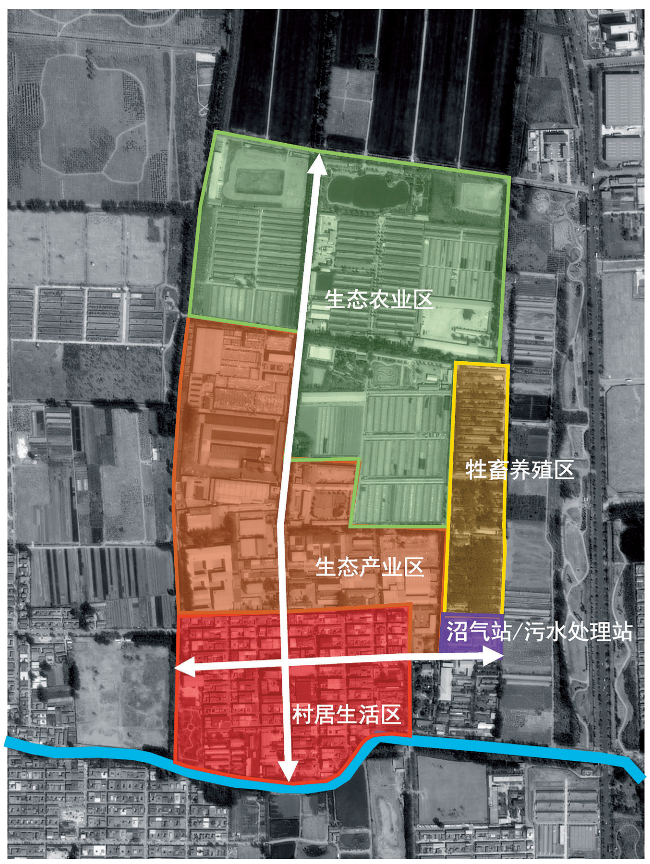

图 8：总体功能布局

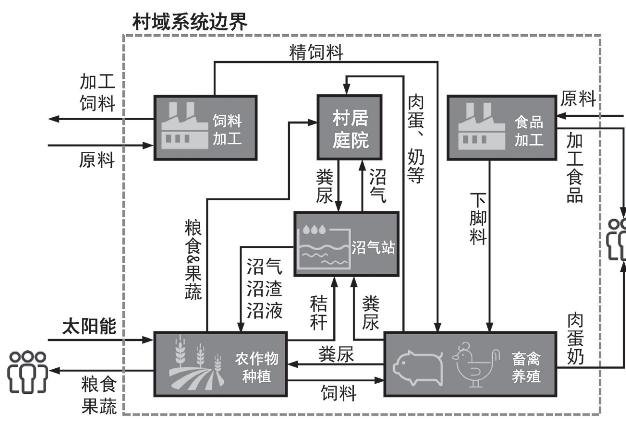

图 9：村域尺度的资源流动和利用状况

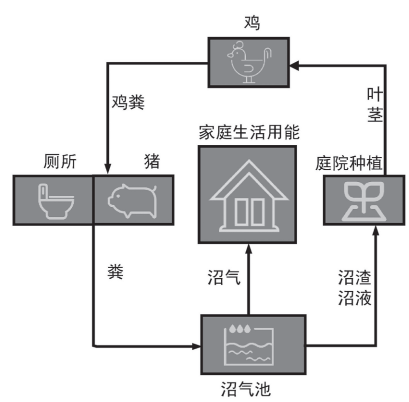

图 10：村居庭院尺度的资源流动和利用状况

砖墙利于通风，并满足庭院和室内遮阳庇荫的需要；资源利用方面，将禽畜养殖、雨水收集、沼气产用、小型温室种植、植物性水体净化等多种适宜资源处理技术设施与建筑室内外空间元素进行巧妙整合。起伏变化的屋顶提供了农作物晾晒场地和村民席地坐的台阶，同时收集雨水用于庭院及小型温室的农作物浇灌；建有地下沼气系统的后庭院靠近猪圈和厕所，便于收集人畜粪便生产沼气；厨房火炉产生的热烟通过传统炕道接入卧室热炕；紧邻卧室的小温室结合特隆布墙，白天充分吸收太阳能为居室供暖，作为种植基层的夯土作为蓄热体可保证夜间的室内温度。

“四季房子”项目展示了资源代谢理念融入乡建设计建造过程，在“低技术、低成本”的条件制约下，综合考虑建造方式的灵活性、资源利用的就地性、生态技术的适宜性及资源代谢的多样性，充分考虑了农民的生产生活方式和邻里交往习惯，构建了适应资源循环利用机制、整合乡村生产生活系统的村居典范（图 13）。

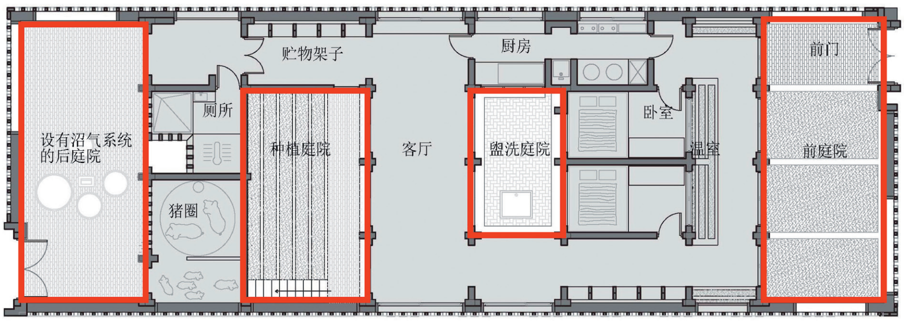

图 11：围绕四个院落组织平面布局

阶梯种植庭院　雨水收集净化庭院　设有地下沼气系统的庭院

图 12：资源利用设施与院落空间整合

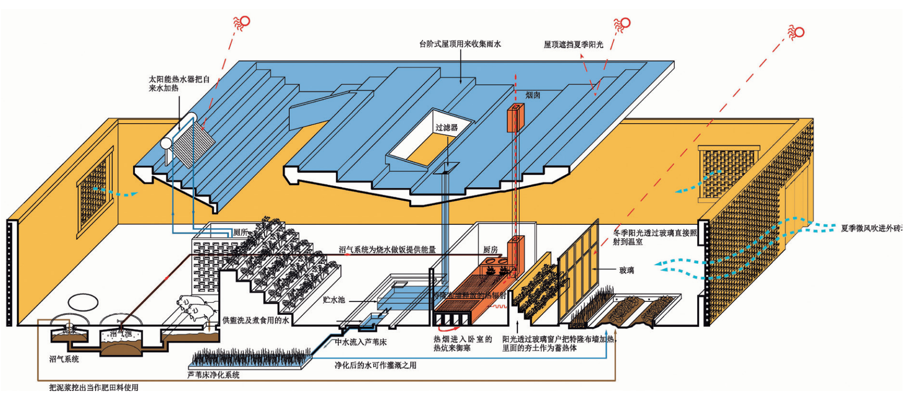

图 13：“四季房子”的资源代谢技术系统

图 14：融合水体净化的梯田湿地景观

图 15：公共活动融入生态景观

3. 基于水循环代谢的村庄公共空间更新——莲麻村雨水花园

公共空间是乡村住区的重要组成部分和村民交往的重要场所，资源代谢理念融入公共空间更新营建，可实现促进乡村公共生活与提升生态景观效益的双重价值。中国乡建院在广东从化莲麻村，利用闲置场地、建筑及旧建材，结合当地村民参与营造，探索了水资源循环利用系统介入村庄公共空间更新设计的实现方式（图 14，图 15）。

广州莲麻村生态雨水花园位于广州从化区莲麻村村委会附近，面积约 670m^2。改造前的硬化场地局促单调，缺少活动空间和休憩设施，场地南侧原为地势低洼的废弃鱼塘，逢雨便涝以致常年积水，影响村庄环境和村民生活。虽然近年实施了基础设施改造，但简单模仿城市基建方式，硬化地面并铺设排水管线，后期缺少及时管理维护，每逢雨季仍无法及时存蓄和排泄雨水。因此，改造设计遵循乡村水资源的代谢流动规律，从场地空间资源整合、地形处理和水资源生态净化、材料资源循环利用三个方面践行了适于乡村公共生活及环境特征的资源代谢理念。

场地空间资源整合方面，设计团队将原本分离的废弃鱼塘和村委会前广场连为一体，形成了集散广场区、雨水净化区、景观积水区、休憩观赏区和滨水游览区五个主题功能空间，同时增加凉亭等休闲设


图16：场地空间整合

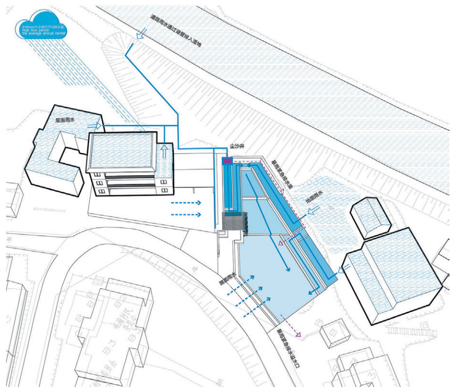
图17：水资源生态净化

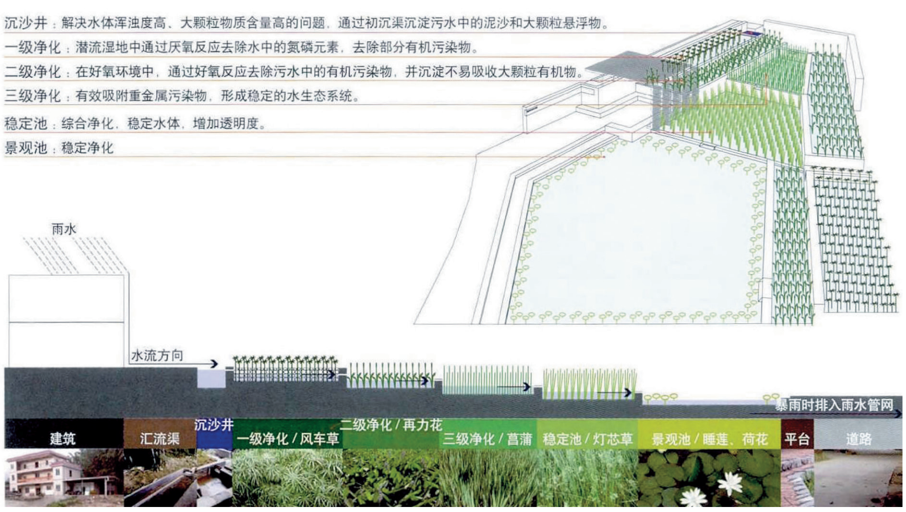

图18：人工湿地景观系统的水体净化过程

施元素，吸引村民进入和使用（图16）。地形处理和水资源生态净化方面，充分利用现状地形高差，结合季节性水流量核算，确定梯田状场地设计的形式、位置和深度，种植具有阻拦悬浮颗粒物及泥沙作用的乡土水生植被，形成人工湿地系统，减缓地表水体流速以净化水体，有效提升了环境质量，同时在系统重要节点处设置图文并茂的展牌，实现了参观者与环境之间的积极互动（图17，图18）。材料资源循环利用方面，建造过程遵照“低技术、低成本、适用性”原则，循环利用了本地乡土材料及废弃建材，例如用维修道路所拆除的混凝土砌筑挡土墙和铺筑地面，当地竹材用于建造凉亭等，颇具生态之美和自然野趣。此外，动员村民及当地工匠共同参与建造过程，采用本地施工工艺利于日后维护，也为后续村庄其他改造项目提供了技能培训和工艺样本。

以上三个将资源代谢理念融入乡村住区空间布局、村居建造、公共空间更新的实践案例，展示了包括建筑设计、环境工程在内不同领域的团队，在总结技术可行性和综合效益的基础上，尝试将资源代谢系统与乡村住区各类要素在技术和空间进行整合，并纳入农民生产生活方式习惯等因素，进行了有益实践探索。区别于通常模式下完善空间形态后再叠加生态技术手段的可持续设计实操路径，融入资源代谢理念的乡村空间优化设计，将乡村内在资源流动转化特征作为前置出发点，通过适宜生态技术设施植入和生产生活方式融入，指导和影响乡村功能布局和空间形态表达，更符合可持续设计的本质内涵。留民营村各主要功能区及资源处理设施的总体空间布局直接关联主要资源高效循环利用路径；“四季房子”的建筑形态及庭院布局方式遵循“低成本、低技术”条件下的资源混合利用策略，并充分考虑村民生产生活及邻里交流习惯；莲麻村雨水花园的公共空间场地设计表达，更多是基于现状地形条件及水体实现生态化收集净化效果所需的适宜流程、流速和流量等技术性因素，并非单纯从空间美学角度出发。但限于乡村地区居民的技术水平、认知差异和资金投入制约，除了早期有限的生态乡村建设案例，实践样本数量较少且多聚焦于中微观尺度的单体建筑和特定类型空间，还未从深层次的乡村资源流动代谢规律入手，形成适用于乡村住区村域尺度的系统性实操方法。

四、结语与启示

新的城乡融合背景下乡村住区建设、资源高效利用的生态意义及相关技术问题在国内外学术界得到较多关注，资源代谢理论已经应用于乡村住区空间问题研究。相关学者从环境工程、生态经济等视角出发，以技术探索和实证研究为主，借用城市代谢问题的研究方法和技术手段，针对乡村空间和资源高效利用进行研究和探索，对乡村住区空间的设计研究具有启发和指导意义。然而目前为止，乡村住区空间作为资源代谢有机体的本质属性，及各种物质和能量流动的内在规律尚未得到足够的认知和理解，国内相关领域较少跨学科探讨乡村生态系统中各类资源要素的流动机制及其与空间形态的互动关系，资源代谢理论和资源代谢分析方法罕见应用于乡村规划及设计研究中。其主要原因包括以下几个方面：(1) 城市代谢视角下的资源代谢分析多是将人居环境系统视作资源流动的空间“黑箱”，关注资源量化核算，缺少资源流动过程与空间维度的互动关系探索；(2) 城市代谢的研究方法和技术手段，虽然在资源管理、空间操作方面提供了有益借鉴，但面对资源利用模式、空间构建逻辑和社会组织结构迥异的乡村住区表现出一定的局限性；(3) 资源代谢理论研究和实践探索多聚焦于宏观的城乡区域层面，或是微观层面的村居单体、公共空

间等特定类型，相对缺乏村域尺度的乡村资源代谢系统与住区空间营建模式的整合研究；(4) 日益严格的卫生防疫规定（如禽畜养殖规模数量和卫生距离等），某种程度上增加了在村庄团组邻里和村居庭院中整合生产生活空间系统的技术难度。

针对当下乡村振兴背景下如火如荼的乡村设计营建，源于城市代谢和产业生态学等学科，关联人居空间与资源代谢机理的系统性理论探索，及处于初期探索阶段的实践研究，虽具有一定局限性，但其从构建生态可持续设计基础的资源代谢视角出发，对中国现阶段生态乡村住区的空间优化及系统营建问题具有重要启发和借鉴意义。首先，以资源代谢过程为基础，以各类资源流的运行转化过程和生态作用机理为手段，结合以资源高效利用和资源流代谢分析为目标导向的乡村空间发展模式，有效拓展了乡村住区的设计理论。其次，以资源高效利用为目标、以各类资源要素在乡村空间中的流动过程特征及代谢作用机制为切入点，融入适宜的资源流分析、资源利用技术体系和空间形态构建方法，从本质上揭示资源代谢系统与乡村生产、生态和生活空间的互动规律，为有效、规范和系统的指导我国乡村生态问题的认知和分析，提供了新的理性方法。再次，传统资源管治模式和运行机制下，相关职能部门通常将“水、能源、食物”视为独立的资源管理议题，难以形成集成化解决方案，而以资源为目标导向的设计策略，可有效整合不同利益主体的观点和诉求，在关注如何量化和评估乡村资源流的同时，通过设计方式，将不同类型的资源流流动及流量状况纳入乡村住区空间进行协同考虑，以实现对于资源代谢状况的改善和优化，可有效提升资源管理的效率和效度。最后，乡村住区的空间模式研究与建构，需要综合考虑技术、社会、生态等多重因素，以资源代谢的系统视角审视技术与空间的动态制约关系，需充分考虑现实中我国乡村环境风貌管控、乡村社会组织与管理运行方式、经济可行性等社会经济性因素，可提升研究成果的指导效度、可操作性和科学性。

注释

[1] “三生一体”是生产、生活、生态一体化的简称，这一表述方式最早由中国学者提出，用以表述水稻田的多重利用价值，因其科学化表达出农业与人居环境之间的内在关系，逐渐被政府和学者广泛引用，作为农业和乡村社会、经济、环境可持续发展总体目标的表述框架。生产、生活、生态三个概念分别对应人居环境中的农业、居住空间和自然环境三个相对独立的子系统。

参考文献

[1] 高晓明，王志鹏，赵继龙，毛晓天，刘长安. 城市代谢导向下的荷兰可持续城市规划与设计理念探析[J]. 国际城市规划，2020，35 (04)：114-123.
[2] Wolman, Abel. The metabolism of cities. Scientific American, 1965, 213 (3)：178-193.
[3] Baccini P, Brunner P H. Metabolism of the Anthroposphere：Analysis, Evaluation, Design[M]. The MIT Press, 2012.
[4] Chapman R. Resilient Cities：Responding to Peak Oil and Climate Change[J]. Australian Planner,2012, 46 (1)：59-59.
[5] Odum H T, McGraw-Hill E C O. Energy basis for man and nature. Water Management,1978,3229(8)1.
[6] Norman R. Scott, Integration of Sustainable Systems for Agro-Eco-Industrial Rural Community Development[J]. Presented at the International Forum on Bioenvironmental and Bioenergy Engineering.China Agricultural University.2003 (11) .
[7] 岳晓鹏，张玉坤. 国外生态村概念演变及发展历程研究[J]. 建筑学报，2011 (S1)：123-129.
[8] 刘长安，赵继龙. 生产·生活·生态——城市“有农社区”研究[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2016.
[9] Spiller Marc, Agudelo Claudia. Mapping diversity of urban metabolic functions：a planning approach for more resilient cities[J]. In Proceedings of the 5th AESOP Young Academics Network Meeting 2011, Delft, 15-18 February 2011：126-139.
[10] Tillie N, Dobbelsteen AV D, Doepel D, et al. Towards CO_2 Neutral Urban Planning：Presenting the Rotterdam Energy Approach and Planning (REAP) [J]. Journal of Green Building, 2009, 4 (3)：103-112.
[11] Chertow M R. Industrial symbiosis：literature and taxonomy[J]. Annual review of energy and the environment, 2000, 25 (1)：313-337.
[12] Korhonen, Jouni. Two paths to industrial ecology：applying the product-based and geographical approaches[J]. Journal of Environmental Planning and Management, 2002, 45 (1)：39-57.
[13] 陈小卉. 当前我国乡村空间特征与重构要点[J]. 规划师，2007 (8)：79-82.
[14] 张磊，朱颜. 农村绿色基础设施对农村规划建设模式的影响[J]. 建筑与文化，2010 (7)：32-37.
[15] 周中仁，陈群，张虹波，吴文良. 北方农村“四位一体”模式调查研究[J]. 可再生能源，2007 (4)：93-96.
[16] 李东升，燕亚飞. 新农村庭院农业与景观一体化建设模式探索[J]. 安徽农业科学，2008，36 (27)：11736-11737.
[17] 刘夏，梅嬉蝶. 黄柏峪村：世界第一村构想破产[J]. 新知客，2009 (06)：70-73.
[18] 席晓萌. 生态庭院V2.0-高密度背景下传统生态庭院更新设计研究[D]. 山东建筑大学，2014.
[19] 卞有生. 北京市大兴县留民营村的庭院经济系统[J]. 农村生态环境，1995 (01)：56-59.
[20] 李吉进，张一帆，孙钦平主编. 农业资源再生利用与生态循环农业绿色发展[M]. 北京：化学工业出版社，2019.3.
[21] 林君翰,关帼盈,黄稚沄. 四季：一所房子,石家村[J]. 世界建筑，2012 (12)：26-31.
[22] 傅英斌. 聚水而乐：基于生态示范的乡村公共空间修复——广州莲麻村生态雨水花园设计[J]. 建筑学报，2016 (08)：101-103.

图片来源

图1，图3～图6，图8：作者拍摄或自绘
图2：作者基于参考文献[5]改绘
图7：作者基于参考文献[16]改绘
图9，图10：作者基于参考文献[17]改绘
图11，图13：作者基于参考文献[19]改绘
图12：来源于参考文献[19]
图14，图15：来源于参考文献[20]
图16～图18：作者基于参考文献[20]改绘

说　明

本刊212期《先进制造业的典型生产模式对于建筑设计平台架构的启示》一文作者林再国非该文通讯作者，《文化选择与接受的产物：20世纪新艺术运动在中国的传播模式及其形态特征解析》文中图3g为“济南德华银行旧址，1901年”。特此说明。

本刊编辑部