养分循环代谢的城市可持续社区探析

Research on Urban Sustainable Community Based on Circular Metabolism of Nutrients

刘长安 赵继龙 高晓明

Liu Chang'an, Zhao Jilong, Gao Xiaoming

摘要: 在当前城市面临的种种困境里, 养分线性代谢是一个日益严重却被长期忽视的问题, 构建新的城市养分代谢系统、重新闭合养分循环是一个必要措施。本文以马克思“代谢断层”理论为切入点, 分析城市养分自然循环过程遭受破坏后带来的代谢失衡等严重后果; 从社区层面入手, 把社区代谢废物视为可以循环利用的养分资源, 关联废弃物、肥料、农业、食物及居民等诸多要素, 促进形成社区内部递进往复的养分循环过程, 以修补代谢断层。本文以鄂尔多斯郝家社区为例, 将农业要素融入社区空间, 重构社区基础设施, 循环利用社区代谢废物, 解析在社区尺度实现城市养分闭合循环的作用机理, 并介绍相关的可持续社区规划理念, 以期为我国快速城市化背景下的城市可持续社区发展提供有益的启示。

Abstract: Currently, the global nutrient crisis has developed to a rather critical situation that cannot be ignored. Hence, constructing a kind of new urban-nutrient-metabolism system and reclosing the nutrient-cycling have become an indispensable strategy. Based on the theory of Metabolic Rift, this paper analyzes the serious consequences of metabolism imbalance and treats the metabolic waste as nutrient resources that can be recycled. Associating various factors, such as the waste, fertilizer, agriculture, food and people, the process of nutrient recycling will be promoted and the Metabolic Rift can be eliminated. Taking the Haozhakui Community as an example, this paper analyzes the mechanism of achieving nutrient recycling and introduces the design ideas of relating sustainable community, so as to provide Chinese sustainable community development with new approaches and new methodologies.

关键词: 养分循环; 城市代谢; 城市农业; 有农社区; 可持续社区; 代谢断层

Keywords: Nutrient Recycling; Urban Metabolism; Urban Agriculture; Agro-integrated Community; Sustainable Community; Metabolic Rift

国家自然科学基金 (51778349、51378301、51608307), 山东省社会科学规划研究项目 (15CCXJ08) 资助

作者: 刘长安, 山东建筑大学建筑城规学院, 副教授。2295721@163.com
赵继龙, 山东建筑大学建筑城规学院
高晓明, 山东建筑大学建筑城规学院

引言

随着城镇化进程的不断推进, 2013—2015 年中国城镇化率由 53.7% 上升至 56.1%, 年均提高 1.2%^[1], 是世界上城镇化率增速最快的国家之一。然而, 城市规模的扩大、人口的激增意味着城市物质消耗和生态系统压力的剧增, 城市化在带动人类物质文明繁荣发展的同时也带来了不可避免的负面效应。

其中, 城市养分线性代谢是一个日益严重却长期被忽视的问题。在生态问题的语境中, 养分主要指农作物生长所必需的氮、磷、钾等大量性元素, 它通过循环代谢维系自然生态系统的健康运行, 并通过农业—食物系统, 把人类社会与自然生态系统内在地连接为有机整体。食物从土壤中汲取的养分经过城市的消费后, 代谢为排泄物和厨余垃圾等有机垃圾。在工业革命以前, 这些所谓的有机“废物”是可利用的养分资源, 通常以肥料的形式返回农田, 从而形成闭合的养分循环。这一模式在中国古代被发展得尤其完善, 并在世界范围内得到认可。19 世纪末, 西方国家发明了集中供排水系统和抽水马桶以后, 虽然有效地改善了人类的生活条件和城市的卫生状况, 但也严重干扰了养分的自然循环过程, 大量养分无法返回土壤, 阻断了城市与土地之间养分代谢的通路, 致使现代城市成为单一的资源消耗者和垃圾排放者, 造成养分、资源的单向流动和线性代谢。

长此以往, 土地养分将被逐渐榨干, 只能依靠化学肥料补充地力, 而化肥的生产不但消耗大量不可再生资源, 其施用也会对土壤造成不可逆转的破坏。这将加剧资源消耗和土地污染, 形成生态的恶性循环。中国工程院院士段宁指出, 当前社会发展中所面临的诸如生态环境恶化、资源短缺、气候变化等一系列困境的本质是人类, 特别是城市人群的各类活动所产生的物质代谢出现了问题^[2], 进而严重影响了人类

社会自身的生存与可持续发展。

1 循环代谢养分，修补“代谢断层”

早在19世纪中后期，马克思在其后期著作中就系统地提出了关于有机物的再循环以及可持续性生态观点，强调人类生产与其自然条件之间存在“代谢断层”(metabolic rift)，揭示出养分代谢过程与当代环境问题的深层次、多维度关联，是环境社会学的经典基础理论之一^[3]。

马克思指出，这些断层割裂了特定的代谢互动，例如农场养分在土壤、农作物、牲畜、肥料和人类排泄物之间的就地循环，也在空间和时间上改变了社会代谢的尺度。由于空间和时间的尺度改变，食物生产系统下的持续性社会代谢耗尽了资源基础，并越来越多地依赖于生态学家所言的对食物网的时间和空间“补贴”。

因此，代谢断层造成的后果一方面是土地养分枯竭，被迫消耗石油等矿藏资源进行贴补；另一方面是城市垃圾围城，为污水脱氧、垃圾填埋等环境问题苦恼不已，甚至不惜排放到自然环境造成严重的污染，威胁人类健康卫生。在19世纪，欧洲和北美资本主义农业的扩张就已经导致了土壤肥力危机。正如马克思在《资本论》中指出的：“资本主义生产……破坏着人和土地之间的物质转换，也就是使人以衣食形式消费掉的土地的组成部分不能回归土地，从而破坏土地持久肥力的永恒的自然条件”^[4]。时至今日，全球养分危机已经到了不容忽视的程度。例如，食物生产所必需且无可替代的磷矿将在50~100年内消耗殆尽^[5]。正是在这个意义上，郝晓地等认为，养分危机远比武危机和能源危机更为严重，亟须优先解决^[6]。

究其根本，上述问题正是因为城市的代谢循环通路断裂造成的。从生态学的角度来看，一切事物都有其去向，在自然界中并没有所谓的“废物”^[7]。现代社区每天都产生大量废水、垃圾、人类排泄物，通常我们只考虑如何处置这些所谓的“废弃物”，却极少将其视为可以循环利用的养分资源。通过变革城市相关基础设施，把线性、开环的养分代谢通路重新闭合成循环流动的回路，使土地流失的养分重新返田，避免养分从农业—食物系统中向外泄露，才有可能从根本上解决这一危机。

以城市垃圾和排泄物形式存在的养分重返农业土壤的概念，是“恢复、偿还性”农业的根本。虽然很少有城市规划者和主流发展实践者向马克思和恩格斯的论述寻求灵感，但是代谢断层理论有其先见之明，不仅关系到可持续农业的发展，而且关系到高速城市化背景下迫在眉睫的城市废物管理和环境危机。倡导者认为，使废物流中的有机成分重返城市地区及其腹地的农业生产，将有助于提高土壤肥力，减少大量使用农用化学品，还可以降低堆填区、垃圾堆与水道大量集中存放废物

所产生的土壤和水域污染。城市农业问题专家穆杰特指出，城市就像一个为了养活日益增长人口而需要不停摄取食物的巨大营养池，如果能够更有效地回收、再利用营养池里的废弃物，形成物质的循环，就可以减少物质的输入和输出，降低城市对环境的影响，城市这个营养池也会因此而更加宜居^[8]。

闭合城市养分循环、修补代谢断层，可以重新把扩大到全球尺度的线性流动拉回更小的地方尺度的闭合循环。作为城市的基本组成要素，在社区尺度上讨论这一理念，可以通过回收社区居民产生的有机废物，并以肥料的形式返回生产食物的农田，形成社区层级的养分微循环，更好地支持城市养分循环。这或许难以解决全部农业养分来源问题，但就当前而言，确是无可替代、成效显著的双赢之举。

近年来在社区层面关注养分循环问题的建设实践颇多。2002年建成的伦敦贝丁顿生态村部分集成雨水和废弃物回收利用系统，经过证明切实有效^[9]；在澳大利亚，查尔斯特大学的Thurgoona校园，包括学生住宿在内，完全由无水堆肥厕所服务^[10]；温哥华东南福溪社区中引入城市农业作为社区可持续发展的重要策略^[11]；鄂尔多斯郝兆奎可持续社区建成了全球第一个在小城镇（不少于1000户）多层楼房中使用生态卫生系统的实验基地。相关的设计实践则从更为理想化的角度进行了探索。从2002年起，瓦赫宁根大学持续开展了名为Agromere的可持续社区设计研究，将城市农业和污水、垃圾处理设施关联起来，重组社区新的循环系统^[12]；与之类似，代尔夫特理工大学建筑系的提莫伦（Timmeren）与建筑师洛灵（Röling）提出可持续植入（Sustainable Implant）理论，以食物、水与能源等城市“关键流”（critical streams）为立足点，构建分布式代谢循环技术体系，并在屈伦博赫的Lanxmeer生态住区规划中加以运用，构建了一个极富创新性的市政设施系统^[13]；荷兰的温室村方案由面积为2hm²的产能温室、具有200间房屋的社区和厌氧消化池等基础设施组成，理想状态下其碳循环和氮循环都是封闭的，为自给自足的社区设计提供了参考^[14]。这些案例虽然各自侧重点和技术体系不尽相同，但闭合养分循环均不约而同地成为规划中统筹考虑的生态策略之一，为可持续社区建设提供了实践经验和理论参考。

2 案例解析——鄂尔多斯郝兆奎可持续社区

郝兆奎社区位于中国鄂尔多斯市东胜区，一期总占地约13.9hm²，总建筑面积约为10.7万m²，由40多栋建筑层数以4~5层为主的住宅楼组成，容纳居民832户共约2912人。社区是瑞典斯德哥尔摩国际环境研究院（SEI）和鄂尔多斯市政府合作研发的、在小城镇多层楼房中使用生态卫生系统的实验基地，其设计目标是改变当前人居方式，改善人与环境的关系。

社区区别于普通住区的显著特征是内部相对封闭的养分循环体系，其作用机理在于就地收集、利用社区产生的富含养分的有机代谢废物，使之转化成为可以利用的有机肥料；经过社区内部城市农业作物种植将肥料中的养分转化为人类可以食用的食物，再通过社区居民对食物的代谢开启新一轮的养分循环过程（图1）。

2.1 城市农业融入社区

城市农业作为一种城市养分代谢循环的调节器和连接器，其多重效用得到国内外学者的充分认可。郝兆奎社区将农业要素引入社区空间，利用农业自身优势为社区提供多重效益。作为可持续社区规划的重要组成部分，农田的存在可以循环使用城市废物，闭合社区养分循环，改变现代城市养分单向流动的现状，弥补当前可持续社区建设中的实践盲点，还可减少污水排放、垃圾填埋对环境的影响和对农田的侵占，降低垃圾和化肥运输带来的能耗和污染。

社区储尿池收集的尿液、生态站高温处理后的有机肥都可以返回农田，提高土壤肥力、为农作物提供养分，并且整个过程天然无公害，大大降低了化肥的使用量，为社区供应绿色有机农产品。

2.2 重构社区基础设施

社区采用的全新基础设施由粪尿分离式生态厕所、生活污水收集处理系统、垃圾分类收集处理系统以及社区生态站构成。生活污水处理和人类排泄物、有机垃圾的管理是郝兆奎社区重点解决的问题。与传统社区将排泄物等代谢废物直接输出社区的方式不同，郝兆奎社区从源头上控制废弃物，将社区内的代谢废物分门别类收集，进行无害化、资源化处理后加以循环利用，为社区农田提供有机肥料，进而发展生态农业，并提供给社区居民食用，形成社区系统内部养分、水分等物质的部分闭合循环，尽可能地使人类代谢和生产农作物所需的营养物达到自然平衡，形成良性循环（图2）。

图1 社区养分循环图解
资料来源：作者绘制

（1）粪尿分离式生态卫生厕所

生态卫生厕所是郝兆奎社区基础设施的重要组成部分。社区新型厕所与传统卫生间的主要区别在于采用了粪尿分集式坐便器和单独设置的小便器。社区每一户住宅的卫生间都有单独的粪桶、粪管和配套的排风系统。活动式粪桶放置于每个厕所对应的落粪管道下方，并与通风系统相连以减弱室内气味。使用时用锯末、粉碎的秸秆等干物质代替水将粪便“冲”到下方的落粪桶里，并在其中进行粪便的初级处理。带有轮子的活动粪桶由管理人员定期收集并运送至生态站进行下一步高温堆肥处理后用于农田。卫生间内还有独立设置的排尿管道，直接与楼底部的地下储尿池相连。尿液在储尿池中收集并封闭储存一个月左右即可直接稀释后作为肥料为农田提供氮、磷、钾等作物必需养分（图3）。

生态卫生厕所将尿液和粪便分类收集，把它们当作资源而不是废弃物，可以防止人类排泄物对环境造成污染和破坏，并把这些资源里的养分加以恢复和循环再利用，可以改善土壤结构并为农业供应肥料，是社区养分循环系统的重要一环。

（2）生活污水与垃圾处理

社区生活污水主要包括不含黑水的浴室、厨房和洗衣等优质杂排水，其处理工序相比混合人类排泄物的黑水要简易

图2 社区物质循环示意图
资料来源：作者绘制

图3 郝兆奎社区的尿粪分离长落粪管型厕所
资料来源：参考文献[15]

得多。社区在生态站设置了中水处理设施，污水不排入市政管网，而是通过重力汇集到位于小区最低点的处理厂，就地收集、处理，减轻了市政管网的压力。经过处理后的中水达到灌溉水质标准，可以用于社区内农田与绿化的灌溉。

社区采用源头分类收集的方式，将厨房厨余垃圾和其他生活垃圾在各住户分类收集，集中到居民楼附近的微型生态站——分类收集垃圾桶。其中可堆肥的有机垃圾送到社区生态站中的堆肥厂，与收集的人类排泄物共同进行发酵堆肥处理，其余垃圾则通过生态站的固体垃圾站进一步分类，收集可以回收利用的材料，剩余的少量无法再利用的垃圾转运出社区，大大减少了垃圾的排出量。

(3) 社区生态站

生态站是社区不可或缺的组成部分，也是整个社区的物质处理与循环中心，由中水站、堆肥厂、垃圾站等部分组成，对各个处理系统收集的排泄物以及社区的垃圾、废水进行无害化和资源化处理。在生态站中，堆肥厂采用有氧堆肥处理技术，对社区内收集的粪便、有机生活垃圾、沉淀池污泥等统一集中处理，历经发酵堆肥、脱臭、储存等流程，最终形成有机肥料并返回农田；社区灰水收集进入中水站加以净化再利用，非生物降解的部分垃圾也可在垃圾站分拣以供循环利用（图4）。

2.3 自上而下的运行参与方式

郝兆奎社区由国际研究机构和地方人民政府合作研发，具有典型的自上而下特点。社区对各个系统和程序的运行与管理作了统筹策划，入住居民需要了解社区规划运行模式，注重环保意识，掌握固体垃圾分类收集和管理的方法，鼓励

使用能够循环利用的包装物，以减少额外的垃圾产生量。由于社区的规模较大，实际运行过程中采用模块化概念分区管理，以生态卫生系统的最大服务片区为一个模块，每个模块独立运行，在模块内进行垃圾的分类回收，尿液、粪便的分离收集，以及生活污水的处理。相比传统社区，郝兆奎社区的建设与运行相对复杂，更加需要政府、设计与科研部门、企业和组织、居民等行为主体的共同参与和积极配合。

2.4 案例评析

郝兆奎社区是国际合作的试点社区，试图完善城市养分代谢循环，将污染物的末端治理改为源头治理，对生态卫生系统、农业融入社区等理念进行了难得的实践，也为可持续社区建设带来有益的启示。

(1) 郝兆奎社区自身可以消纳产生的人类排泄物和部分有机垃圾，完善了城市养分代谢循环，减少了养分的流失。人类平均每天约排泄0.5 kg粪便和1.0 kg尿液^[16]，约含有1.9 g氮元素和0.33 g磷元素，因此2 912人的郝兆奎社区每年通过生态卫生系统约可回收2 019 kg氮肥和351 kg磷肥。如果按照220 kg氮元素/年·hm²的标准，可以在9.17 hm²土地上替代化学肥料^[17]，能够满足整个社区施肥的需求，甚至可以有部分肥料输出。此外，在社区的生活固体垃圾中，约有40%~50%是可以用来堆肥的生物性有机物，通过与人类粪便共同堆肥后可以变成优质的腐殖质和有机肥。相比化学肥料，这些有机肥不但安全无害，还减少了废弃物排放，闭合了养分的循环，可以使代谢废物中的氮、磷、钾回归土壤，防止养分的流失，是应对养分资源危机的有效措施。

(2) 郝兆奎社区通过采用生态卫生和中水回用系统，可以大幅节约市政供水输入，同时减少污水的输出。鄂尔多斯东胜区居民每日人均生活用水为80升左右，根据实测，采用粪尿分离式生态卫生厕所的郝兆奎社区每日人均居民生活用水为47.7升，节水率达到40%，年节水产生效益94.7万元；以小区为单位的相对分散式的中水处理虽然投资较高，但避免了输送灰水的排水管道系统的投资，每年可减少城市污水和垃圾处理建设费用169万元^[18]。

然而，由于当前生态卫生系统的应用还不成熟，在建设和管理过程中缺乏相关的技术经验、建设规范，造成系统的推广有一定阻碍，造价及运行费用也相对较高。相关数据显示，郝兆奎社区生态卫生系统的建设总投资为958.275万元，是同等规模传统卫生系统投资的2.21倍；社区入住率为100%时，考虑水和肥料回收效益后的年运行费仍高达30.799万元，是同等规模传统卫生系统的2.15倍^[18]。虽然社区具有减少废弃物排放、完善养分循环等不可估量的附加效益，但由于缺乏相关政策的支持，难以转化为推动社区建

图4 社区生态站
资料来源：同图3

设和发展的直接效益。此外,由于生活、卫生习惯问题,以及产品工艺和质量带来的气味和卫生问题,居民对尿粪分离式坐便器的接受程度并不高。针对当地住户的问卷调查显示,仅有39%的住户对生态卫生系统表示满意^[19]。因此,试点结束后,社区最终改回传统水冲式厕所,生态站也随之撤出,正式宣告这一实验项目的终止。

尽管如此,郝兆奎社区试图改变现有城市基础设施模式,对完善城市养分循环进行了有益的尝试,其技术措施与深层次的生态理念依然值得借鉴与推广。

3 结语

在当前生态环境恶化、城市线性代谢的负面效应日益凸显的背景下,养分循环的重要生态意义及相关技术问题在国内外学术界开始得到关注,尤其是城乡养分循环、低密度和低收入社区的分散式养分回收和就地再利用技术均得到了较为充分的讨论并形成共识,很多技术已经成功应用到建筑单体和生态社区的实践中。人们开始反思盲目追求经济发展、代谢失衡和资源过度消耗对生态环境的压力与破坏,建设可持续发展、循环代谢的城市成为当前我国经济社会发展和城镇化建设的新命题。

代谢断层理论认为,养分不能回归土壤主要归咎于城市不合理的现代排污系统。人类自然代谢所产生的排泄物,以及工业生产和消费所产生的废弃物,需要重新返回到生产之中,成为完整的养分代谢循环的一部分,才能有效修补生态断层。19世纪德国著名的农业化学家李比希也指出,现代农业是一种掠夺式的农业,而“土地好比是一个机器,要经常将庄稼从土壤中拿走的东西归还给它,才能恢复它在生产中所消耗的‘力量’”^[20]。当前耕地面积日趋紧张,但人口的增长使得对食物的需求有增无减。盲目依靠化肥补充地力意味着涸泽而渔,只能使土地肥力透支。唯有像前工业社会城市与农村的关系一样,建立循环的养分代谢系统,形成生产、消费、废物利用的闭合循环,使土地流失的养分重新返田,才能解决这一危机。

正如麦克维尔(Mcconville)所言,养分代谢如此重要,在制定任何尺度的城市空间规划设计策略时,都应该把养分再利用问题纳入考量^[21]。作为介于微观的建筑与宏观的城市之间的中观尺度,社区与建筑尺度相比,可以容纳食物生产、食物消费、废弃物收集、养分转化、肥料返田等全过程,分类回收社区内部的有机废弃物并集中转化为农作物可利用的养分,建立更为完整、有效的社区级养分循环系统;与城市尺度相比,社区通常具有相对固定的边界和人群,不需要对基础设施进行过多投资即可建立相对封闭的社区内部养分循环,可操作性较强且相对独立,由此形成的养分循环半径更

小、效率更高。因而社区是当前可能实现养分闭合循环的适宜尺度,通过社区内部废弃物的收集与再利用,闭合社区内部养分循环,可以更加有效地支持整个城市的代谢系统,值得在我国可持续社区建设中加以推广应用。UPL

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 以消费升级为导向 加快推进供给侧结构性改革[EB/OL]. [2016-03-29]. http://www.stats.gov.cn/tjgz/tjdt/201603/t20160329_1337129.html.
- [2] 段宁. 物质代谢与循环经济[J]. 中国环境科学, 2005(3): 320-323.
- [3] 马克思, 恩格斯. 马克思恩格斯选集(第3卷)[M]. 北京: 人民出版社, 1972.
- [4] 马克思. 资本论(第一卷)[M]. 中共中央马克思、恩格斯、列宁、斯大林著作编译局, 译. 北京: 人民出版社, 2004: 579.
- [5] CORDELL D, DRANGERT J-O, WHITE S. The story of phosphorus: global food security and food for thought[J]. Global Environmental Change, 2009, 19: 292-305.
- [6] 郝晓地, 衣兰凯, 王崇臣, 等. 磷回收技术的研究现状及发展趋势[J]. 环境科学学报, 2010(5): 897-907.
- [7] 巴里·康芒纳. 封闭的循环[M]. 侯文蕙, 译. 长春: 吉林人民出版社, 1997: 36.
- [8] 卢克·穆杰特. 养育更美好的城市——都市农业推进可持续发展[M]. 蔡建明, 郑艳婷, 王妍, 译. 北京: 商务印书馆, 2008: 35.
- [9] CHANCE T. Towards sustainable residential communities: the Beddington zero energy development (bedzed) and beyond[J]. Environment and Urbanization, 2009, 21(2): 527-544.
- [10] MITCHELL D S, CROFT I, HARRISON T, et al. Water management on the Thurgoon Campus of Charles Sturt University[M] // PATTERSON R A, JONES M J, eds. Proceedings of on-site'01 conference: advancing on-site wastewater systems. University of New England, Armidale, Australia, 2001: 287-294.
- [11] 赵继龙, 蔡嘉星, 史克信. 温哥华绿色冬奥村——解读东南福溪高密度社区的生态策略[J]. 华中建筑, 2011, 29(9): 176-180.
- [12] JANSMA J E. Agromere: integrating urban agriculture in the development of the city of Almere[J]. UA Magazine, 2011(25): 28-31.
- [13] RÖLING W, TIMMEREN A van. Introducing urban agriculture related concepts in the built environment: the park of the 21st Century[C] // Proceedings of the 2005 world sustainable building conference. Tokyo, 2005: 2147-2152.
- [14] MELS A R, ANDEL N, WORTMANN E, et al. Greenhouse village, the greenhouse-powered, self-sufficient neighbourhood[C] // Proceedings of international conference on Asia-European sustainable urban development, Chongqing University, 2006.
- [15] 雨诺·温布拉特, 梅林·辛普生-赫伯特. 生态卫生——原则、方法和应用[M]. 朱强, 肖钧, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [16] MAYLING Simpson-Hebert. 生态卫生与生态城市发展[J]. 规划师, 2003(1): 15-19.
- [17] 谭英, 戴安娜·米勒·达雪, 彼得·乌尔曼. 曹妃甸生态城的生态循环模型——能源、水和垃圾[J]. 世界建筑, 2009(6): 66-75.
- [18] 周律, 李健. 生态卫生系统在中国北方城镇的费用效益分析: 案例研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2009(3): 364-367.
- [19] 肖钧. 鄂尔多斯生态城镇项目中基础卫生设施建设的生态设计与管理[D]. 西安: 西北大学, 2007.
- [20] 尤·李比希. 化学在农业和生理学上的应用[M]. 刘更另, 译. 北京: 农业出版社, 1983.
- [21] MCCONVILLE J. Sustainable sanitation in cities-a framework for action[M]. Papiroz Publishing House, 2011.

(本文编辑: 王枫)