

DOI: 10.5846/stxb201809141996

吕永龙,曹祥会,王尘辰.实现城市可持续发展的系统转型.生态学报,2019,39(4): - .

Lu Y L, Cao X H, Wang C C. Systematic transformation towards urban sustainable development. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(4): - .

实现城市可持续发展的系统转型

吕永龙^{1,2,*}, 曹祥会^{1,2}, 王尘辰^{1,2}

1 中国科学院生态环境研究中心/城市与区域生态国家重点实验室,北京 100085

2 中国科学院大学,北京 100049

摘要:城市在为人类提供各种生态系统服务的同时,其发展中的各类问题限制着城市生态系统本身的可持续发展。首先概述了城市发展过程中面临的挑战,主要包括城市化过程中人与自然的关系问题及社会生态问题等;其次从可持续发展的内涵、社会-经济-自然复合生态系统和驱动力-压力-状态-影响-响应(DPSIR)的理论出发,分别从城市水供给和污水处理系统、消减城市废弃物排放、城市交通和区域规划、城市发展与粮食系统供求关系、城市清洁能源系统等5个方面对如何实现城市的转型进行了系统的论述。结合我国城市可持续发展的研究进展,指出城市的可持续发展问题不仅是城市自身的问题,也是城市与周边区域的协调发展问题。为此,文章提出必须基于五个“转向”来研究和建立城市化与区域生态的耦合和协调机制。

关键词:城市可持续发展;转型;社会-经济-自然复合系统;DPSIR 模型

Systematic transformation towards urban sustainable development

LU Yonglong^{1,2,*}, CAO Xianghui^{1,2}, WANG Chenchen^{1,2}

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Cities have offered diversified ecosystem services for human wellbeing, while various kinds of problems emerging in urban development have hindered the sustainability of urban ecosystems. This paper presented the major challenges for urbanization including ecological and social problems as a result of rapid urban development. Based on the connotation of sustainable development, theory of Social-Economic-Natural Complex Ecosystem and Driver-Pressure-State-Impact-Response (DPSIR) model, urban water supply and sewage treatment systems, urban waste emission reduction, urban transportation and regional planning, food systems in response to urban expansion, and urban clean energy systems were systematically discussed to achieve the urban transformation. In view of the urban sustainable development in China, it is not just about city itself but also about its integrated relationships with its surrounding regions. Therefore, the paper suggested that the coupling and coordination mechanisms between urbanization and regional ecology be studied and established based on the five “transformations”.

Key Words: urban sustainable development; transformation; social-economic-natural system; DPSIR model

世界范围内正经历着前所未有的城市扩张,迄今为止全球一半以上的人口都居住在城市内。据估计到2030全球城市居民的数量将增加到50亿人,且未来95%的城市扩张会发生在亚洲和非洲的发展中国家,这

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0505704);国家自然科学基金重点项目(41420104004)

收稿日期:2018-09-14; 修订日期:2018-11-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yllu@cees.ac.cn

无疑将对社会、经济和环境带来巨大的变化^[1-3]。改革开放以来,中国的城市化已经发展到史无前例的规模^[4],城市化水平由 1978 年的 17.92% 上升到 2017 年的 58.52%, 预计 2030 年中国城市人口将达到 68.7%^[5-8]。城市为人类提供了便利的基础设施和舒适的生存环境,促进了社会经济的高效发展,依据联合国开发计划署的人类发展指数,中国的主要城市均取得了良好成绩^[9]。然而,人口的过度密集、空间的过度扩张、城市发展规划的不合理、产业结构的失调和以人类为中心的发展策略等问题导致城市生态格局、生态过程与服务功能发生恶化,影响着城市生态系统的健康与可持续发展^[5]。城市可持续发展就是指在一定的时空尺度上,以长期持续的城市增长及其结构优化,实现高度发达的城市化与现代化,从而既满足于当代城市发展的现实需要,又满足未来城市的发展需要。城市可持续发展既包括经济的可持续发展,又包括社会文明的可持续发展和生态环境的可持续发展,其核心是实现经济、社会和生态环境的协调发展。

1 城市可持续发展面临的主要挑战

城市化是经济增长的引擎,有助于资源的积聚与转化和社会劳动生产率的提高。城市作为人类活动最为集中的场所,是人类社会影响自然环境的热点区域,因此,城市化在为人类带来福祉的同时,也衍生出各种问题,进而制约了社会、经济和环境的持续发展。城市可持续发展的主要问题在于社会、经济和自然系统各部分或者整体的失衡,协调人与人、人与自然的关系是关键所在^[10]。

1.1 城市中的人与自然关系问题

自然生态系统为人类提供了巨大的生态服务功能,城市生态环境通过物质流、能量流和信息流,为居民提供包括生物多样性、初级生产力、气候调节、养分供给、消除污染、散热、美学和娱乐休闲在内的生态服务产品^[11-12]。城市化对自然环境的影响主要表现在对资源的过度消耗、城市用地改变原有的土地覆盖、污染物排放造成的环境质量下降、人类活动的过度干扰造成的生态系统退化等方面。城市的快速扩张和发展通常以消耗大量资源为代价,如中国城市用水量占总用水量的比例已经超过了 30%。城市化进程中,既消耗了大量的自然资源,也向环境介质排放了大量的污染物(图 1),导致水、土和大气环境质量的恶化^[13-14],而城市环境的污染又进一步对居民的人体健康造成了危害^[1]。

城市的快速发展激化了城市土地需求、农田土地需求和生态土地需求之间的矛盾^[5,15-16]。1980—2015 年间,中国由于城市化导致的土地净生产力损失为 1.695 百万吨碳当量,其中由于城镇土地替代了农田所导致的损失占 63%,农田生态系统的整体质量下降^[17-18]。城市建设改造致使流域土地利用的类型发生了剧烈的变化^[19-21],这些变化使得河流水系的生态完整性遭到严重破坏,导致其生态系统服务功能急剧退化甚至丧失^[22]。此外,城市发展还会导致植被和生物多样性锐减、城市热岛、极端气候变化、城市内涝、地面沉降等问题。快速的城市发展导致城市植被覆盖率下降,景观结构破碎化程度增加、连通性降低,物种多样性减少等^[23-24]。城市是温室气体排放最为集中的区域,温室气体的大量排放^[25-26]引起气候变化,导致极端高温事件和洪涝灾害的发生频次增加和影响范围的扩大^[27-29]。这些人类活动所造成的环境和生态问题又反过来制约着人类社会和经济的发展。

1.2 城市化过程中的社会问题

城市快速发展产生的社会问题不容忽视,如粮食安全问题、流行病肆虐、社会差异增大、“城中村”的社会环境问题、人口的过度聚集、排外情绪的产生、城市各部门的失调、环境问题的不透明性等,造成了各种“城市社会病”的频发。

城市发展到一定程度就会出现增长和公平之间的矛盾,就业制度、家庭和人口结构、社会福利等因素引起了城市社会两极分化、产生不公平^[30]。由于发展的不平衡,“半城市化人口”的社会保障缺失,导致了城市居民的基本权利的不对等、劳动保障程度低以及贫富差距扩大^[31],并由此引发社会阶层的对立^[32]。社会的不公平不仅与收入分配不均息息相关,而且与人口在城市中的空间位置密切相关^[33]。随着城市的过度扩张,建设土地和农用土地的矛盾增加。城市用地规模扩张一方面有助于缓解城市居民的居住不公平问题,降低住房

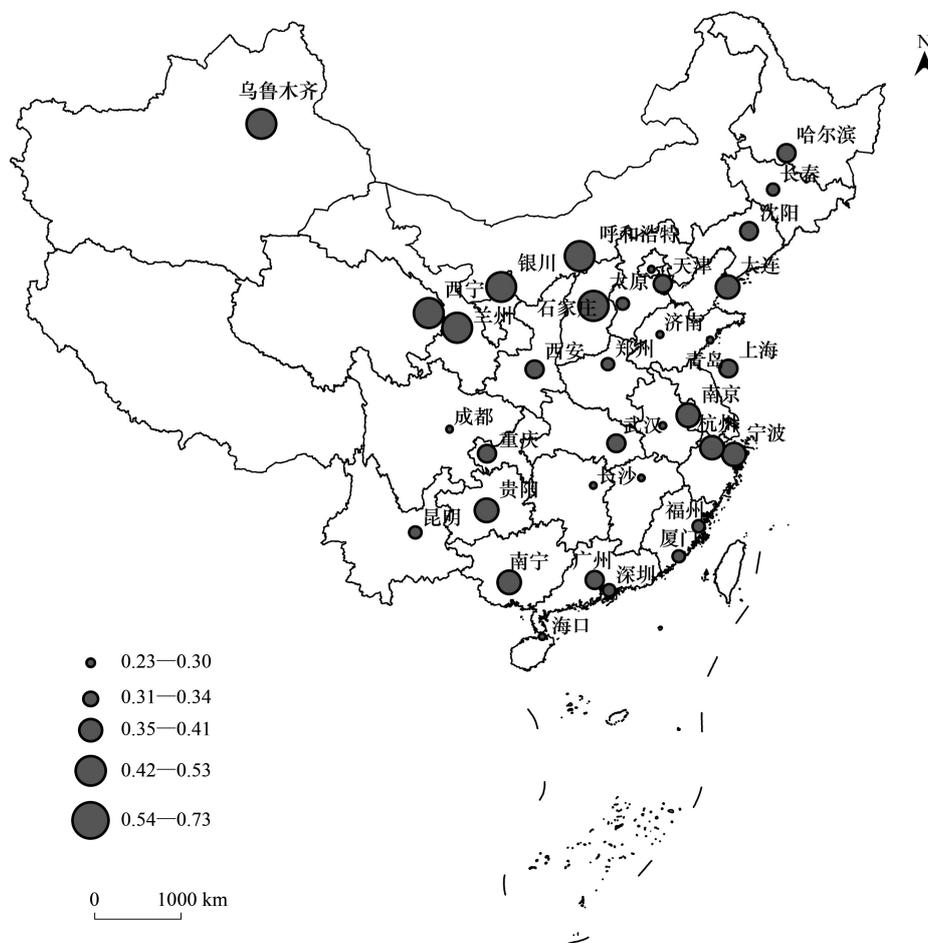


图1 2016年中国主要城市的污染排放指数

Fig.1 Emission index of major cities in China in 2016

的稀缺性,缩小城市人口住房购买力的差距,从而缓解城市中的居住隔离现象^[34]。但另一方面城市的不合理扩张造成了区域土地的割裂,破坏了生态系统的景观格局,在后续建设不足的情况下更易出现“城中村”的各类问题。在城乡转变的过程中,“城中村”滋生诸多社会安全隐患^[35]。由于全部或大部分耕地被征用,农民集体转为居民,但是仍然保留着传统农村本色,整体经济落后,产业结构不合理,不但自身的竞争力水平难以提高,而且也不利于城市整体规模经济效益的形成。

城市的过度膨胀在对区域环境造成巨大影响的同时,基础设施建设、服务和管理滞后,引发了一系列的问题和矛盾,主要表现在人口膨胀、交通拥堵等方面^[36]。中国的城市面临前所未有的拥挤,深圳的人口密度高达 17150 人/km²,上海和北京的人口密度分别为 13400 人/km²和 11500 人/km²,远远高于发达国家和地区主要大城市的水平,如日本东京为 5984 人/km²,美国纽约、英国伦敦、法国巴黎和中国香港的人口密度最多只有 8500 人/km²。城市人口的膨胀加剧了交通拥堵,交通的拥堵又进一步导致能源的大量消耗和城市空气质量的下降。最终,这些社会经济问题又通过资源消耗、土地流转、污染物排放、消费行为等方式直接或间接地对环境造成影响。

2 对城市可持续发展转型的系统性思考

2.1 城市可持续发展的核心内涵

可持续发展(Sustainable Development)是一个内涵十分丰富的概念,涉及资源、经济、社会、文化、技术等众多领域。概括起来可以归纳为 3 个方面:自然资源与生态环境的可持续发展、经济的可持续发展和社会的可

持续发展^[37-39]。具体表现在以下 2 个方面。(1) 消费需求与资源可供量的协调。地球可供使用的资源数量是有限的,因此在现有的生产技术条件下,人类的生产生活方式必须要有效、节制地使用资源为前提;(2) 人口与资源环境的协调。人口的过快增长会增加资源环境的压力,过快的人口增长会引发粮食危机、耕地危机、水源危机、生态危机和农业危机,而农业危机又会驱使农民大量涌入城市,从而引发城市危机。控制城市人口增长,使城市人口与生产潜力相协调,是城市可持续发展对人类自身的又一要求。

联合国的可持续发展目标(SDGs)中,第十一个目标(SDG 11)即为“实现城市和社区的可持续发展”。该目标认为城市的可持续发展的主要表现和方式包括为城市居民提供舒适、安全和价格合理的住房和基础服务;通过国家和区域发展规划协调和维持城市、城郊和农村周边生态系统之间的良性关系;减少城市活动和经济发展的环境影响;综合政策、技术、规划等手段提高城市资源利用效率,减缓气候变化进程,增强城市对灾害、气候变化的适应性和抵抗性;促进城市和人口的良性增长等。具体地说,城市可持续发展包含社会公平、经济持续发展、可持续且更加清洁的能源结构、废弃物的妥善处置和回收利用、资源的循环利用、更加清洁和便捷的交通、生态环境保护和改善、更加合理的城市规划和良性的土地利用循环等方面。

2.2 从社会-经济-自然复合生态系统认识与解析城市

城市是以人的行为为主导、自然环境为依托、资源流动为命脉、社会文化为经络的社会-经济-自然复合生态系统(图 2)^[39-40]。自然、社会、经济三个子系统之间相生相克、相辅相成,要实现其协调发展,必须了解各个子系统内部以及三个子系统之间在时间、空间、数量、结构、秩序方面的生态耦合关系。其中,社会系统和经济系统的发展依赖于自然系统提供的资源和服务,同时通过土地利用、污染物排放、物质循环过程等方式对自然系统的水、土、气、生物体产生影响,而这些影响又反作用于社会系统和经济系统的发展。另外,社会系统和经济系统的相互关系,又影响着人类对于自然系统开发和保护的方式。

城市是一个复杂的生态耦合体,其社会、经济、自然系统是相互耦合而非从属关系,虽然功能不同,但缺一不可^[39]。20 世纪 70 年代以来,一些学者根据生态足迹理论、能值理论、系统动力学理论和耗散结构理论将定性 with 定量相结合、优化和模拟相结合,对城市复合生态系统可持续发展状态进行了研究^[41-43]。王如松等从 20 世纪 80 年代研究和发展了一套定量和定性相结合,从测定到测序、从优化到进化,面向系统功能的共轭生态管理方法^[39],认为三个子系统通过物质流、人口流、能量流、信息流和资金流等紧密地结合在一起,共同组成城市系统的整体功能。因此,实现城市的可持续发展关键在于平衡社会、经济和自然子系统间及其系统内部的关系,达到整体的最优化。

2.3 用驱动力-状态-压力-影响-响应(DPSIR)模型调节城市基本关系

为了有效地处理资源与生态环境问题,需要确定并衡量对生态环境产生压力和影响的诸如社会、经济和技术等各个方面。社会和经济活动会产生环境流,这种环境变迁在给生态环境带来压力的同时,会导致环境状况的变化。环境状态的变化反过来对人类社会活动产生影响。为解决生态环境状况的压力问题,人类又通过社会和经济活动减轻状态改变后的负面效果,最好的途径是通过改变引起环境恶性变化的驱动因素来阻止或者使环境恶化结果最小化。基于这个理论,在压力-状态-相应(PSR)模型的基础上进一步完善,形成了驱动力-状态-压力-影响-响应(Driver -Pressure-State-Impact-Response, DPSIR)关系模型(图 3)。在 DPSIR 中,

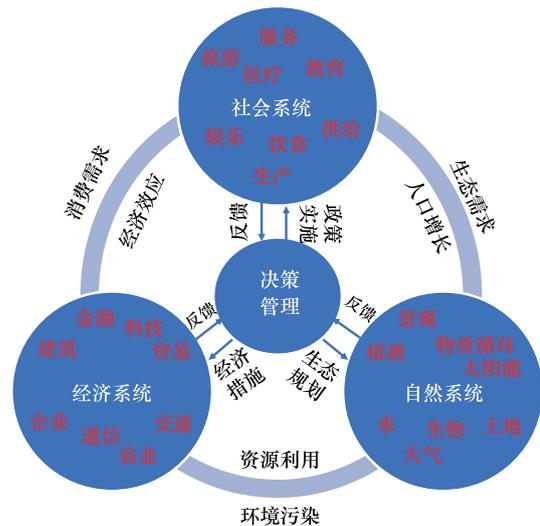


图 2 城市的社会-经济-自然复合系统
Fig.2 Social-economic-natural complex system of cities

最重要的是如何进行响应,人类社会通过决策维持城市社会-经济-自然复合系统的可持续发展。响应行为则应当根据城市发展中出现的社会、经济及生态环境问题,做出及时的回应,以确保城市系统高效、快速以及协调的运转。本文将基于 DPSIR 关系模型的思想对城市各个方面的主要问题展开讨论。

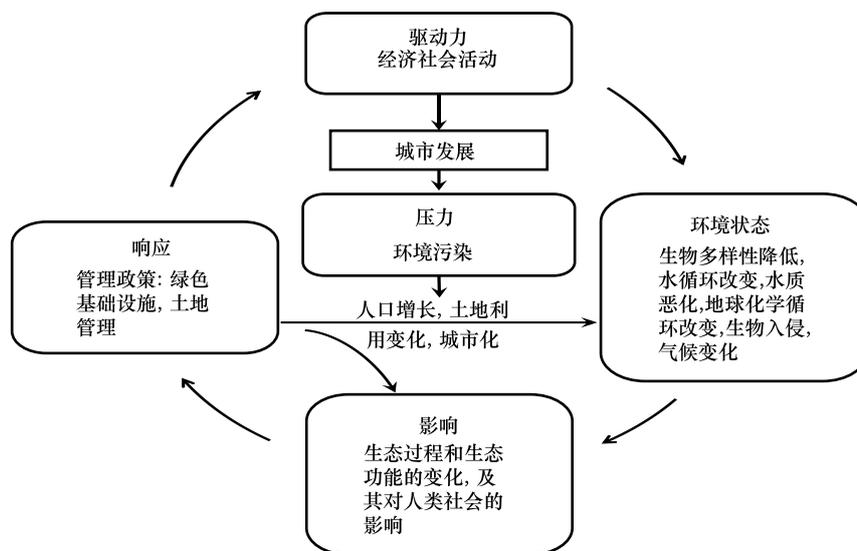


图3 DPSIR 模型中相互关系

Fig.3 Interactions between variables in DSPIR model

2.4 分散与集中相结合的城市水供给和污水处置系统转型

随着城市化进程的推进和人口的不断增长,城市生产生活对水资源的需求日益增加,世界范围内城市水资源匮乏的问题日益突出,而城市水资源利用的主要问题包括了水资源短缺、水体污染严重、水生态退化、城市洪涝灾害等^[44-46]。城市水资源的可持续发展的策略主要包括保护水源和水循环过程、合理利用水资源、有效控制污水排放、推进污水循环利用、综合开发和调控地下水与地表水资源等,其核心内容在于将可持续发展理念融入城市水系统的整体设计、建设和管理,最大程度地实现水资源的循环利用,降低城市生产和生活活动对水体环境的影响,保护和维持水生态系统的整体健康^[47]。现有的污水处理方式可能无法满足未来的城市化需求,因此采用一些新的技术和管理策略,包括水资源整合管理、适应性管理和基于生态系统的技术方法等^[48-50]。其中,雨水的循环利用和城市排污系统的建设最早得到人们的关注,随后提出了可持续的城市管道系统、绿色基础设施建设、水敏感性城市设计、海绵城市等理念,其主要目的在于降低雨水和城市洪涝灾害的影响,同时将其作为城市水资源的重要部分进行利用^[51-52]。另一方面,通过减少污水产量、循环利用、充分利用再生水、提高污水处理能力等方式大大降低水资源的净消耗量,但这在一定程度又增加了对设施、资金、管理和能源的投入^[53]。而对污水的分级回收和处理能极大降低处理设施和回收过程的负担并提高污水的回收效率,例如对于“灰水”的早期回收和利用能够为水资源匮乏地区提供潜在的水源,对高温废水的利用能够提高能源利用率等^[54-55]。在减少人类活动对水资源的影响的同时,加强水源的保护同样重要,地下水回灌,水源地环境保护,集水区和流域的整体规划等一系列技术和管理手段都得到了广泛地推广。在此过程中,越来越多的技术手段和管理框架都更加关注城市个体在整个系统中的重要作用。虽然集中式的水资源处理技术和管理体系在过去一直被认为是最有效的方式,但随着技术水平的提升和城市环境的复杂化,分散式的处理方式在应对面源污染、分级处理、就地回收等方面有更大的优势,而相应的分散式监管能够增强整个系统的稳定性和处理风险的能力^[56]。在技术、组织、管理和规划整体层面上推广应用分散与集中相结合的城市水供给和污水处置系统,可以有效地发挥两者的优势,实现城市水资源利用向可持续性转型。

2.5 以消减城市废弃物排放为目标的产业生态转型

城市发展在消耗资源的同时产生了大量的废弃物,过去的一个世纪里,固体废弃物的产量增长了 10 倍,估计到 2025 年又将增加一倍,而固体废弃物的增长被认为与城市人口数量、居民生活水平以及城市居民的处置方式有密切的关系^[57]。传统的废弃物处理方式包括填埋和焚烧等多关注于废弃物的末端处理,而如今城市可持续发展的目标要求从整个产业链的角度来实现废弃物的减量化、无害化和资源化。全球范围内,各个国家和地区已经开展了一系列的措施来缓解城市的废弃物压力,例如通过物质流和能量流形成产业生态链、设置废弃物处理费、废弃物分类回收处理、减少物质消费等^[58-60]。产业生态园和工业园区建设可以促进产业之间的融合,加强产业间物质流和能量流的流动,最大程度地提升生产效率,减少废弃物的排放^[61]。除生产部门产生的废弃物外,城市废弃物中的大部分来源于消费和使用过程,而对废弃物进行有效回收和处理的关键在于对其进行分类。分类后的废弃物,根据其性质可以采取不同的资源化处理方式,例如厌氧发酵堆肥、化学处理、高温热解等。然而,随着城市的发展和居民生活水平的提高,城市废物的组成成分会产生极大的变化,这又会对原有的分类和处理系统带来冲击^[62]。实际上,城市的废弃物产生量与其人口、生产总值和技术水平并没有绝对的联系,例如日本的人均废弃物产生量是美国的 2/3,而两者的人均 GDP 相差不大,教育、居民意识、政府投入和企业参与等因素在其中发挥了重要作用。在实践中,城市系统和工业生产中的物流和能流联系、技术设施、科技发展、经济效益和政策法规等的相互作用,需要通过“产业生态学”进行深入的研究^[63]。

2.6 以提升城市系统运行效率为目标的城市交通和区域规划转型

交通运输排放的污染物已经成为城市空气污染的主要原因之一^[64]。在确保或增加城市人口流动和物质流通的同时,降低运输过程中的排放将是城市未来发展的重要挑战。世界各地已有不同的城市和地区采取了相应的措施,以期控制越发拥挤的城市交通以及其产生的负面影响^[65]。例如,伦敦为缓解交通拥堵和改善城市空气质量,相继颁布了“清洁伦敦空气”、拥堵税、“低排放区”等政策措施,限制小型或高排放车辆的出行;北京则通过交替限行、车牌摇号、强制报废、提高排放标准等方式减少车流控制排放。虽然以上措施取得了部分成效,但仍离“零排放目标”相差甚远,且随着人口和个人汽车拥有量的不断上升其效果将会受到限制。新能源汽车的发展和推广在一定程度上能够缓解城市的空气污染状况,但是在能源结构不发生变化的情况下,能源消耗和拥堵问题无法得到根本性的解决,而提高出行和整体运输效率的系统性方案才是解决之道^[66]。

大型公共交通网络的建设能够在提升城市整体运输能力的同时,减少私有车辆的出行,降低能源消耗和污染物排放。新兴的个性化交通服务网络,包括共享自行车、共享电动车以及共享电桩等弥补了大型公交系统的空白,并为城市居民提供了更加灵活、节省和健康的出行方式。从长期看,城市发展的区域规划而不是只顾城市自身的规划是实现城市交通整体优化的关键^[67]。城市功能区的分散化和社区化在一定程度上能够减少不必要的长距离迁移,缓解交通拥堵的问题,但同时有可能影响公司企业的规模效应,降低人们的出行欲望。因此,未来城市的发展规划中应当从整个区域系统的角度出发,最大程度地优化交通网络和区域功能,提升城市整体的运行效率。

2.7 以适应城市发展的需求为导向的粮食系统转型

城市的发展和人口的增长依赖于粮食的保障,而全球的城市化进程正逐步影响着粮食供应系统的转变。城市发展主要通过两个方面影响着粮食系统,一是城市的地理扩张影响了农田的整体质量和数量(供给端),二是城市生活水平的提高改变了人们对于食物结构、质量和数量的需求(消费端)。城市的快速扩张导致的农田土地流失已经成为了一个全球性问题,而且大部分城市多发源于优质的农业种植区附近,城市的扩张直接导致了优质土地的减少,农田整体质量和生产力的下降^[68-70]。这进一步导致了农田土地对其他生态系统的侵占,在粮食产地趋于集中化的同时,城市周边的农田系统趋于分散化和破碎化^[71]。大型城市的食物供给越发地依赖于几个主要产地,这一方面增加了粮食产地的环境负担,另一方面在粮食产地受到自然灾害时,城市的粮食安全无法得到保障。但是,粮食产地的集中化又为精细管理、提高农户收入、推广新的农业技术等提

供了一定的便利。从消费端看,城市生活水平的提高导致了对食物需求的变化,这进一步增大了土地、能源和水资源的消耗^[18]。除此之外,城市发展对粮食系统的间接影响并没有受到充分的认识。居民需求、土地政策、市场状况、收入水平、口味偏好等都从不同方面影响着食品的生产、加工、包装、运输、废物处理以及农户的选择等等^[72]。为保障未来城市发展的粮食安全,应当充分认识城市系统各部分与粮食系统的相互影响关系,将城市与区域作为整体,综合规划城市的发展与农田土地和粮食安全的保障。

2.8 以减排和适应气候变化为导向的城市清洁能源系统转型

城市是人类活动引起气候变化最主要的场所,全球碳排放量的 78% 来源于城市,城市的能源消耗量占到总生产量的 75%^[10,73-74]。城市的能源问题不仅是未来城市发展的挑战更是实现低碳城市、缓解气候变化的关键。城市发展的低碳化主要通过两个方面来实现,即从化石燃料转变为更加清洁的能源和尽可能减少能源的消耗。新兴的清洁能源技术为城市能源结构的转变提供了更多的选择方案,而真正实现低碳化需要城市能源系统的转型^[75]。随着技术革新,太阳能、地热、风能、生物质能和废物焚烧发电等新能源的转化效率和可靠性得到了提升,其巨大的潜力并没有得到完全开发。不同的新能源技术存在各自的优势和局限,在实际应用过程中,应根据城市的具体条件形成符合城市自身发展的能源供给体系。虽然新能源技术提供了未来城市能源的发展方向,但是现有的技术在成本、稳定性和效率方面仍存在一定劣势,这导致了在经济效应的驱使下城市低碳化转型存在着极大的阻碍。现有的城市新能源建设主要借助政策的激励,而非市场的驱使,一旦政策发生变化,能源结构的调整将会受到影响。在降低城市能源的消耗方面,建筑和交通是城市能源消耗最大的两个部门,建筑物所消耗的能源占到了整体能耗的 40%,同时贡献了温室气体排放量的 30%^[76-77]。我国高耗能建筑物的比例更是占近 95%,单位建筑面积能耗是发达国家的 2—3 倍^[78]。新的建筑材料的应用、通风制冷系统的整体优化设计、建筑能源的自给化和多样化等,能够极大地提升建筑的能源利用效率。除技术和政策的影响外,人们的消费模式和意愿同样对能源的消耗和选择有很大影响。因此,城市能源的转型需要技术创新、社会、市场和政策的共同推进。

3 走向可持续发展的城市转型研究

关于城市可持续发展的研究主要集中于生态学、经济学和地理学等领域,研究重点包括:(1)城市可持续发展的影响因素,多数研究从资源、环境、交通、社会经济等单因素入手^[79-80],涉及因素间相互作用关系的系统性研究较少;(2)城市可持续发展的模式,如从生态学视角出发构建生态城市、低碳城市、园林生态城市等^[81-82];(3)城市可持续发展规划,将可持续发展理念融入城市总体规划和土地利用规划等方面,如构建可持续发展的道路系统和社区发展形式等^[83];(4)城市可持续发展评价,如城市生态网服务系统评价、可持续发展能力和潜力的评价体系建设及测度、城市承载力评价等;(5)城市生态基础设施建设受到广泛关注,如网络生态廊道、绿色通道、环境廊道、生态网络等^[84],通过对其空间结构和景观类型的研究,调整区域的功能和结构,以改善城市生态系统的结构和功能^[85]。总体而言,城市可持续发展研究已经开始从注重城市经济发展转向注重生态环境或社会生态的视角,国内有关城市资源环境和生态系统的可持续发展的研究已与国外的研究水平相当,而且中国的城市化以及城市可持续发展问题已经成为国际合作研究的重点方向之一。

城市的可持续发展问题不仅是城市自身的问题,也是城市与周边区域的协调发展问题。为此,必须通过以下五个“转向”研究和建立城市化与区域生态的耦合和协调机制:(1)由以城市增长为核心,周边区域以满足城市尤其大都市增长的物质资源需求的模式,转向将城市及其周边区域作为整体系统,统筹协调其持续发展;(2)由重点关注城市对周边区域的经济辐射效应,转向关注城市经济-社会-自然复合生态系统功能,探讨生态城市可能提供的各种生态系统服务;(3)由城市发展带动周边区域资源开发利用的经济驱动方式,转向关注城市转型和区域生态环境效应问题;(4)城市周边区域的功能由满足城市化对各种物质资源的需求,转向如何优化布局其水系、绿地、景观廊道等,提升其对城市化的生态支撑作用;(5)由城市发展优先、区域向城市单向利益输送的管理思路,转向如何实现城市与区域联动、多部门协调、利益分享的一体化多赢管理模式,

以及建立何种决策支持系统实现这些转变。

参考文献 (References):

- [1] Dye C. Health and urban living. *Science*, 2008, 319(5864): 766-769.
- [2] Lahariya C. The state of the world population 2007: unleashing the potential of urban growth. *Indian Pediatrics*, 2008, 45(6): 481-482.
- [3] Rise of the city. *Science*, 2016, 352(6288): 906-907.
- [4] Normile D. China rethinks cities. *Science*, 2016, 352(6288): 916-918.
- [5] 吕永龙, 王尘辰, 曹祥会. 城市化的生态风险及其管理. *生态学报*, 2018, 38(2): 359-370.
- [6] Yin K, Wang R S, An Q X, Yao L, Liang J. Using eco-efficiency as an indicator for sustainable urban development: a case study of Chinese provincial capital cities. *Ecological Indicators*, 2014, 36: 665-671.
- [7] Wang Q S, Yuan X L, Zhang J, Mu R M, Yang H C, Ma C Y. Key evaluation framework for the impacts of urbanization on air environment—a case study. *Ecological Indicators*, 2013, 24: 266-272.
- [8] United Nations. *World Urbanization Prospects, The 2011 Revision*. New York: Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2012.
- [9] UNDP. *A Report on the Sustainable Development of China's Cities*. 2016.
- [10] Grimm N B, Faeth S H, Golubiewski N E, Redman C L, Wu J G, Bai X M, Briggs J M. Global change and the ecology of cities. *Science*, 2008, 319(5864): 756-760.
- [11] 杨振山, 丁悦, 李娟. 城市可持续发展研究的国际动态评述. *经济地理*, 2016, 36(7): 9-18.
- [12] Aminzadeh B, Khansefid M. A case study of urban ecological networks and a sustainable city: Tehran's metropolitan area. *Urban Ecosystems*, 2010, 13(1): 23-36.
- [13] Parikh J, Shukla V. Urbanization, energy use and greenhouse effects in economic development: results from a cross-national study of developing countries. *Global Environmental Change*, 1995, 5(2): 87-103.
- [14] Hobbie S E, Finlay J C, Janke B D, Nidzgorski D A, Millet D B, Baker L A. Contrasting nitrogen and phosphorus budgets in urban watersheds and implications for managing urban water pollution. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(16): 4177-4182.
- [15] 许丽丽, 李宝林, 袁焯城, 高锡章, 刘海江, 董贵华. 2000-2010 年中国耕地变化与耕地占补平衡政策效果分析. *资源科学*, 2015, 37(8): 1543-1551.
- [16] 吕苑鹏. 全国耕地面积继续维持在 20.25 亿亩. *中国国土资源报*, 2016, 34(3): 4-5.
- [17] Li J, Wang Z L, Lai C G, Wu X Q, Zeng Z Y, Chen X H, Lian Y Q. Response of net primary production to land use and land cover change in mainland China since the late 1980s. *Science of the Total Environment*, 2018, 639: 237-247.
- [18] Seto K C, Ramankutty N. Hidden linkages between urbanization and food systems. *Science*, 2016, 352(6288): 943-945.
- [19] 周洪建, 史培军, 王静爱, 高路, 郑憬, 于德永. 近 30 年来深圳河网变化及其生态效应分析. *地理学报*, 2008, 63(9): 969-980.
- [20] Deng X J, Xu Y P, Han L F, Song S, Yang L, Li G, Wang Y F. Impacts of urbanization on river systems in the Taihu Region, China. *Water*, 2015, 7(4): 1340-1358.
- [21] 许有鹏. 长江三角洲地区城市化对流域水系与水文过程的影响. 北京: 科学出版社, 2012.
- [22] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [23] Platt R H, Rowntree R A, Muick P C. *The Ecological City: Preserving and Restoring Urban Biodiversity*. Amherst: University of Massachusetts Press, 1994: 463-464.
- [24] Alberti M, Correa C, Marzluff J M, Hendry A P, Palkovacs E P, Gotanda K M, Hunt V M, Apgar T M, Zhou Y Y. Global urban signatures of phenotypic change in animal and plant populations. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(34): 8951-8956.
- [25] Murray V, McBean G M, Bhatt M, Borsch S, Cheong S. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. *Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, 2011, 18(6): 586-599.
- [26] Kalnay E, Cai M. Impact of urbanization and land-use change on climate. *Nature*, 2003, 423(6939): 528-531.
- [27] Sun Y, Zhang X B, Ren G Y, Zwiers F W, Hu T. Contribution of urbanization to warming in China. *Nature Climate Change*, 2016, 6(7): 706-709.
- [28] Hallegatte S, Green C, Nicholls R J, Corfee-Morlot J. Future flood losses in major coastal cities. *Nature Climate Change*, 2013, 3(9): 802-806.

- [29] Gaines J M. Flooding: water potential. *Nature*, 2016, 531(7594): S54-S55.
- [30] European Commissions. *European Sustainable Cities Report*. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 1996.
- [31] 汝信, 陆学艺, 李培林. 社会蓝皮书: 2012 年中国社会形势分析与预测. 北京: 社会科学文献出版社, 2012.
- [32] Kain J F. Housing segregation, negro employment, and metropolitan decentralization. *The Quarterly Journal of Economics*, 1968, 82(2): 175-197.
- [33] Kahn M E. Does sprawl reduce the black/white housing consumption gap? *Housing Policy Debate*, 2001, 12(1): 77-86.
- [34] Haughton G. *Sustainable Cities*. London: Jessica Kingsley Publishers, 1996.
- [35] 国土资源部. 全国土地利用总体规划纲要(2006—2020). [2008-10-24]. http://www.mlr.gov.cn/xwdt/jrxw/201606/t20160623_1409630.htm.
- [36] Bai X M, Shi P J, Liu Y S. Realizing China's urban dream. *Nature*, 2014, 509(7422): 158-160.
- [37] Guidotti T L. Health and urban ecosystems. *Archives of Environmental & Occupational Health*, 2010, 65(1): 54-55.
- [38] McDonnell M J, MacGregor-Fors I. The ecological future of cities. *Science*, 2016, 352(6288): 936-938.
- [39] 王如松, 欧阳志云. 社会-经济-自然复合生态系统与可持续发展. *中国科学院院刊*, 2012, 27(3): 337-345.
- [40] Pollock K. Policy: urban physics. *Nature*, 2016, 531(7594): S64-S66.
- [41] 高长波, 张世喜, 莫创荣, 陈新庚. 广东省生态可持续发展定量研究: 生态足迹时间维动态分析. *生态环境*, 2005, 14(1): 57-62.
- [42] 陆宏芳, 沈善瑞, 陈洁, 蓝盛芳. 生态经济系统的一种整合评价方法: 能值理论与分析方法. *生态环境*, 2005, 14(1): 121-126.
- [43] 马国丰, 陆居一. 国内外系统动力学研究综述. *经济研究导刊*, 2013, (6): 218-219.
- [44] 杨柳, 马克明, 郭青海, 赵景柱. 城市化对水体非点源污染的影响. *环境科学*, 2004, 25(6): 32-39.
- [45] Vörösmarty C J, Green P, Salisbury J, Lammers R B. Global water resources: vulnerability from climate change and population growth. *Science*, 2000, 289(5477): 284-288.
- [46] 中国工程院"21 世纪中国可持续发展水资源战略研究"项目组. 中国可持续发展水资源战略研究综合报告. *中国工程科学*, 2000, 2(8): 1-17.
- [47] Bruaset S, Rygg H, Sægvog S. Reviewing the long-term sustainability of urban water system rehabilitation strategies with an alternative approach. *Sustainability*, 2018, 10(6): 1987.
- [48] Endo T. Groundwater management: a search for better policy combinations. *Water Policy*, 2015, 17(2): 332-348.
- [49] Varis O, Enckell K, Keskinen M. Integrated water resources management: Horizontal and vertical explorations and the 'water in all policies' approach. *International Journal of Water Resources Development*, 2014, 30(3): 433-444.
- [50] Marlow D R, Moglia M, Cook S, Beale D J. Towards sustainable urban water management: A critical reassessment. *Water Research*, 2013, 47(20): 7150-7161.
- [51] Fletcher T D, Shuster W, Hunt W F, Ashley R, Butler D, Arthur S, Trowsdale S, Barraud S, Semadeni-Davies A, Bertrand-Krajewski J L, Mikkelsen P S, Rivard G, Uhl M, Dagenais D, Viklander M. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more—the evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water Journal*, 2015, 12(7): 525-542.
- [52] Gaines J M. Flooding: water potential. *Nature*, 2016, 531(7594): S54-S55.
- [53] Grant S B, Saphores J D, Feldman D L, Hamilton A J, Fletcher T D, Cook P L M, Stewardson M, Sanders B F, Levin L A, Ambrose R F, Deletic A, Brown R, Jiang S C, Rosso D, Cooper W J, Marusic I. Taking the "waste" out of "wastewater" for human water security and ecosystem sustainability. *Science*, 2012, 337(6095): 681-686.
- [54] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. *Using Graywater and Stormwater to Enhance Local Water Supplies: An Assessment of Risks, Costs, and Benefits*. Washington, DC: The National Academies Press, 2016.
- [55] Meggers F, Leibundgut H. The potential of wastewater heat and exergy: decentralized high-temperature recovery with a heat pump. *Energy and Buildings*, 2011, 43(4): 879-886.
- [56] Larsen T A, Hoffmann S, Lüthi C, Truffer B, Maurer M. Emerging solutions to the water challenges of an urbanizing world. *Science*, 2016, 352(6288): 928-933.
- [57] Hoornweg D, Bhada-Tata P. *What a Waste: A Global Review of Solid Waste Management*. Washington, DC: World Bank, 2012.
- [58] van Berkel R, Fujita T, Hashimoto S, Fujii M. Quantitative Assessment of Urban and Industrial Symbiosis in Kawasaki, Japan. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(5): 1271-1281.
- [59] Karagulian F, Belis C A, Dora C F C, Prüss-Ustün A M, Bonjour S, Adair-Rohani H, Amann M. Contributions to cities' ambient particulate matter (PM): A systematic review of local source contributions at global level. *Atmospheric Environment*, 2015, 120: 475-483.
- [60] Ausubel J H, Waggoner P E. Dematerialization: variety, caution, and persistence. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(35): 12774-12779.
- [61] Hoornweg D, Bhada-Tata P, Kennedy C. Environment: waste production must peak this century. *Nature*, 2013, 502(7473): 615-617.

- [62] 齐宇, 朱坦, 高帅, 王军锋, 汲奕君, 张墨, 卜欣欣. 中国产业园区循环化改造应用关键物质流典型路径分析方法. 生态学报, 2016, 36(22): 7335-7345.
- [63] Kennedy C, Baker L, Dhakal S, Ramaswami A. Sustainable urban systems. *Journal of Industrial Ecology*, 2012, 16(6): 775-779.
- [64] Colville R N, Hutchinson E J, Mindell J S, Warren R F. The transport sector as a source of air pollution. *Atmospheric Environment*, 2001, 35(9): 1537-1565.
- [65] Parrish D D, Zhu T. Clean air for megacities. *Science*, 2009, 326(5953): 674-675.
- [66] Kelly F J, Zhu T. Transport solutions for cleaner air. *Science*, 2016, 352(6288): 934-936.
- [67] 陆建, 王炜. 从城市交通规划发展看城市交通可持续发展规划. 华中科技大学学报: 城市科学版, 2003, 20(3): 11-15.
- [68] d'Amour C B, Reitsma F, Baiocchi G, Barthel S, Güneralp B, Erb K H, Haberl H, Creutzig F, Seto K C. Future urban land expansion and implications for global croplands. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(34): 8939-8944.
- [69] Godfray H C J, Crute I R, Haddad L, Lawrence D, Muir J F, Nisbett N, Pretty J, Robinson S, Toulmin C, Whiteley R. The future of the global food system. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2010, 365(1554): 2769-2777.
- [70] Foley J A, Ramankutty N, Brauman K A, Cassidy E S, Gerber J S, Johnston M, Mueller N D, O'Connell C, Ray D K, West P C, Balzer C, Bennett E M, Carpenter S R, Hill J, Monfreda C, Polasky S, Rockström J, Sheehan J, Siebert S, Tilman D, Zaks D P M. Solutions for a cultivated planet. *Nature*, 2011, 478(7369): 337-342.
- [71] Barbier E B. Explaining agricultural land expansion and deforestation in developing countries. *American Journal of Agricultural Economics*, 2004, 86(5): 1347-1353.
- [72] Popkin B M. Urbanization, lifestyle changes and the nutrition transition. *World Development*, 1999, 27(11): 1905-1916.
- [73] Brown L R. *Eco-Economy: Building an Economy for the Earth*. New York: Norton, 2001.
- [74] Kennedy C A, Ibrahim N, Hoornweg D. Low-carbon infrastructure strategies for cities. *Nature Climate Change*, 2014, 4(5): 343-346.
- [75] Kammen D M, Sunter D A. City-integrated renewable energy for urban sustainability. *Science*, 2016, 352(6288): 922-928.
- [76] United Nations Environment Programme. *Buildings and Climate Change: Summary for Decision-Makers*. 2009.
- [77] 刘恒伟, 麻林巍, 付峰, 黄河, 李政, 倪维斗. 城市交通能源可持续发展规划理论体系初探. 中国能源, 2007, 29(4): 21-25.
- [78] 沈清基. 中国城市能源可持续发展研究: 一种城市规划的视角. 城市规划学刊, 2005, (6): 41-47.
- [79] 李迅, 刘琰. 中国低碳生态城市发展的现状、问题与对策. 城市规划学刊, 2011, (4): 23-29.
- [80] 张伟, 张宏业, 刘婷, 祝炜平. 我国生态城市建设的时空演化格局及其驱动机理分析. 城市发展研究, 2012, 19(5): 44-49.
- [81] 仇保兴. 紧凑度和多样性——我国城市可持续发展的核心理念. 城市规划, 2006, 30(11): 18-24.
- [82] 林珍铭, 夏斌. 嫡视角下的广州城市生态系统可持续发展能力分析. 地理学报, 2013, 68(1): 45-57.
- [83] 吕一河, 马志敏, 傅伯杰, 高光耀. 生态系统服务多样性与景观多功能性——从科学理念到综合评估. 生态学报, 2013, 33(4): 1153-1159.
- [84] 李春荣, 耿涌, 薛冰, 任婉侠, 董会娟. 基于 DEMATEL 的城市可持续发展障碍因素分析——以沈阳市为例. 应用生态学报, 2012, 23(10): 2836-2842.
- [85] Liu Z Y, Pu C L, Yan Z M, Wei Z, Li Q, Huang X D. Influence factors of urban sustainable development of Xinjiang Uyghur Autonomous region—with a case of Urumqi. *Agricultural Science & Technology*, 2013, 14(11): 1674-1678, 1682-1682.