

城市生态承载力理论与提升逻辑：历史性、关联性与非线性^{*}

刘耕源^{1,2)†} 王雪琪^{1,3)} 王宣桦⁴⁾ 杨青⁵⁾ 陈钰¹⁾

(1)北京师范大学环境学院,环境模拟与污染控制国家重点联合实验室,100875,北京;

2)北京市流域环境生态修复与综合调控工程技术研究中心,100875,北京;

3)中国气象局公共气象服务中心,100081,北京; 4)中国人民大学公共管理学院,100872,北京;

5)广东工业大学环境生态工程研究院,大湾区城市环境安全与绿色发展教育部重点实验室,510006,广东广州)

摘要 城市可持续发展如何与城市生态承载力相协调,关系到城市自身的命运,也关系到其周边地区能否顺利实现高质量、可持续发展的目标。本研究重新梳理了生态承载力的概念与发展迷思,从系统组成、承载对象、承载供给与需求的特点、环境影响及支撑的理论基础等方面整理了生态承载力的内核,以及与资源、环境承载力和其他复合承载力的差异性。基于现有的生态承载力评价方法,提出了生态承载力提升的非线性特征及与资源、环境承载力之间的关联关系框架。研究发现,在通过政府决策提升生态承载力时,需要充分考虑其在横向(部门)和纵向(跨尺度)方面的协调性问题。

关键词 生态承载力;关联性;非线性;承载力提升;城市

中图分类号 X192

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2021151

0 引言

承载力的概念源自生态学,是指在某一时间空间内、某一环境条件下,可维持某物种个体的最大数量,早期应用范围只限于生态学领域。20世纪以来,工业化进程不断加快,人口持续膨胀,人类对自然资源的掠夺式开发和对环境的污染,对生态系统施加了前所未有的巨大压力,生态系统面临着巨大的风险,承载力的概念发展并应用到人类生态学中。Living planet report-2018指出,当前人类利用1.7个地球的资源才能满足我们所需要的产品和服务^[1]。人类要想实现可持续发展,必须把消耗控制在生态系统所能承载的能力范围内,这也是实现联合国可持续发展目标的基础。1992年,联合国环境与发展大会(UNCED)提出“准确计算地球的承载能力和地球对人类社会经济活动的恢复能力是可持续发展战略的基本问题”^[2]。2020年8月15日,中国科协在第22届中国科协年会闭幕式上正式发布了10个对科学发展具有导向作用的科学问题和10个对技术与产业具有关键作用的工程难题,其中“如何优化变化环境下我国水资源承载力,实现健康的区域水平衡状态”入选10大前沿科学问题,这说明当前承载力相关研究仍然存在难以攻破

的难题。生态系统承载力(多数研究简称为生态承载力)研究作为度量可持续发展的工具之一^[3],其理论及方法备受国内外学者的关注,至今仍是生态学、地理学与环境科学的交叉前沿领域^[4]。

城市,自古以来就是人类活动集中的主要场所,它聚集了一定地域范围内的物质、财富、人才和科技等,其社会经济活动相比周围乡村倍加繁荣。但与此同时,城市人口爆炸、资源短缺、环境污染、生态破坏等问题也十分突出,城市生态承载力对城市发展的约束日益引起人们的关注。随着中国经济由高速增长阶段转向高质量发展阶段,迫切需要开发活动约束在资源环境承载力内,基于资源环境承载力的评价结果,统筹布局生态、农业、城镇等功能空间,划定生态保护红线、永久基本农田和城镇开发边界等空间管控边界,实现可持续发展^[5]。如何科学定量评价城市生态承载力,协调人地关系,指导城市空间布局,保障城市的可持续发展,是当前重要的理论课题和实践任务。2020年1月召开的中央经济工作会议,习近平总书记明确提出了“推动形成优势互补高质量发展的区域经济布局”“增强中心城市和城市群等经济发展优势区域的经济和人口承载能力”。而生态环境是

^{*} 北京市科技计划课题资助项目(Z181100005318001);国家自然科学基金资助项目(52070021)

[†] 通信作者:刘耕源(1983—),男,博士,教授。研究方向:城市代谢与生态管理。E-mail: liugengyuan@bnu.edu.cn

收稿日期: 2021-06-08

中心城市和城市群高质量发展、承载力提升的关键要素和基本底色,城市可持续发展如何与城市生态承载力相协调,关系到城市未来自身的命运,也关系到其周边地区能否顺利实现高质量、可持续发展的目标.可见,城市生态系统承载力研究有十分重要的时代意义.

1 城市生态承载力的理论基础与基本属性

1.1 城市生态承载力的理论基础 生命体相关的研究多认为出现在 19 世纪初,例如用“代谢”描述细胞中的化学变化^[6],后来,它也被应用于生化领域,其中生化代谢是指由酶催化的复杂生化反应,用来研究调节底物的浓度以及反应速率.这类微观生物学研究用于表征生物内部部分(细胞水平)与生物本身以及外部环境之间的有机分解过程^[7].自 20 世纪末以来,微观生物学领域的发展为人们理解提供了全新的视角.这种跨尺度的概念隐喻是基于“绝大多数生物具有相同的基本生化过程.但是,资源的吸收,转化和分配的速率可能有很大的不同”^[8].根据这种观点,可以将生态系统视为与生物相似的功能实体,然后进行分析以描述能量流和养分流的动态变化^[9].这也直接引起了哲学认知领域的变革,并逐渐引起多学科的交织与变化.在城市生命体的研究方面,人们开始认识到城市和生物在很多方面都具有相似性,如它们都具有复杂、自组织、主体性等基本特性.Odum^[10]的研究解释了人工生态系统和自然生态系统之间的结构和功能相似性.像城市这样的人工生态系统,像生物一样,需要能源和资源投入并产生废物^[11].各方面的比较奠定了这两个概念相连接的基础.因此,通过仿生学和类比,生命体的概念已逐渐引入人工生态系统的研究中,尤其是城市.这种研究方法被用来分析人类社会与其自然环境之间的物理交换过程(物质和能量流),以及人类社会内部的物质和能量流^[12].借助生物学的研究范式为城市研究提供了一个新的视角,也为新的城市发展理论奠定一个新的认识基础^[13].城市是一个具有生命力和高度智能的开放复杂巨系统.

1)城市是具有生命特征的系统,其子系统由城市的土地、人、交通、建筑、能源、信息、资源等多要素构成.Wolman^[14]是城市新陈代谢最早的提出者,他在《Urban Metabolism》一书中指出,城市代谢应包括“维持城市居民在家、工作和娱乐所需的所有材料和商品”.该研究借鉴了生物学中的健康生命体的研究成果,当生命体的各个子系统(如他用排泄系统类比废

弃物处置、血液系统类比交通协同等)良好运转,就可以支撑整个城市的健康发展.

2)城市具有在时空尺度的自我更新与生长消亡的演化特点,并能进行自我调控.不少研究将城市发展与生物学中的合成代谢和分解代谢进行了比较,定义了城市新陈代谢,并使用电脉冲和血液的连接和循环作为单个生命体发育、更新/突变、衰退/进化等的基础^[15].新发现带来的健康范式的转变,促使研究者从城市的成长、更新/突变、衰退/进化等维度进行重新解读.

3)将城市类比为生态系统时会产生第二层的复杂性.实际上,正如 Odum 等^[16]所表明的那样,资源(材料、能源和信息)的流动产生了现有的层级结构,从中可以推断出不同水平的能源品质.在信息流中,信息可用于理解城市的本体论,如生命的内在规律以及价值观、精神、文化意识等.因此,有必要以组成部分之间的流动形式重新研究其与形成整体之间的关系.

城市作为一个高度复杂的综合体,与自然界生命体一样,是一个复杂的大系统,而其又由涉及经济、环境、文化等多个子系统共同关联.城市生命体是由土地、人、资源、能源、自然、交通、建筑、信息等多要素组成,能通过与生物体类似的新陈代谢方式进行能量转换和物质循环,具有在时间和空间上的生长消亡和自我更新的演化过程,并能进行自我调控.代谢过程也会产生复杂性,它是从城市系统的复杂输入中产生的.特别是初始条件和边界条件的复杂性决定了系统的时空演化的不确定性^[17],也使得城市的承载力会因为自组织原理而体现出承载力的放大或缩小的复杂差异^[18],这些复杂性具有时间尺度性和空间异质性^[19].

1.2 城市承载力的研究历程 承载力研究大致经历了种群承载力、资源承载力、环境承载力和生态承载力 4 个阶段^[20].Park 等^[21]从种群数量角度出发,首次将“承载力”(carrying capacity)概念引入生态学领域,用来表示在一定区域和时间内、不损害牧场的情形下,牧场所能供养的最大牲畜数量.Odum^[22]在其著作《Fundamentals of Ecology》中,第一次把承载力的概念与逻辑斯蒂曲线的理论最大值常数联系起来,给出了承载力的数学意义即为逻辑斯蒂方程中的常数 K ,将承载力概念定义为“种群数量增长的上限”,从此生物在自然条件制约下的种群数量增长规律就统一在承载力这样一个形象直观的概念下面^[23].1972 年罗马俱乐部发表的《增长的极限》体现出了科学家们的忧虑,承载力有关的研究从围绕生物种群生物学和应用生态学开始,并进一步深入为以人类或人类活动

为承载对象的承载力研究^[24]。

在研究人类系统的承载力初期, 学者们沿用传统的种群生态学承载力模型中最大种群数量之一概念, 希望对地球可承载的最大人口数量进行评估^[25]。然而学者们很快发现, 科技、文化、消费、贸易、价值观念以及社会政治和法律制度等人类文化社会因素对承载力能产生质的影响, 人类社会经济、科技发展给未来人口发展造成巨大的不确定性, 传统的种群生态学承载力模型并不能完全描述真实的人口变化, 要想预测人口极限似乎是不太可能完成的事^[26]。承载力研究自 20 世纪 90 年代以来进入了瓶颈期, 西方学者已将研究重心转移到适应性(adaptation)与恢复力(recovery)等方面^[27-28]。

因此, 以人类为承载对象的承载力研究不再单纯围绕种群数量增长的上限讨论, 而是研究相对于承载体而言, 不使承载体崩溃的一个限度^[29]。承载力研究范围也逐渐扩展, 衍生出针对不同承载对象和承载体的承载力研究, 如土地承载力、资源承载力、环境承载力和生态承载力等^[30-31], 表征特定系统对某种承载对象的容纳能力。19 世纪 70 年代以来, 工业化和城市化进程不断加快, 资源短缺、环境污染、生态破坏等问题日益严重, 人们发现单一要素的承载力研究已经不能解决人类社会面临的问题^[32], 于是生态承载力研究从资源/环境承载力研究的基础上发展起来, 从生态系统中的单一要素转向整个生态系统, 更多地关注复合生态系统的完整性、稳定性和协调

性, 比资源/环境承载力研究更加复杂、综合、丰富、全面^[33]。

由于生态系统较复杂, 人们对其内部结构与功能的认识还不够充分, 基于不同视角, 生态承载力的概念内涵和表征方式呈现多样化, 目前还没有统一的定义。表 1 整理了 20 多年以来不同学者从不同角度提出的生态承载力概念: Rees 等^[34]从地球自然资源承载的角度, 认为生态承载力是可以供给内部人口日常生活、生活所需的各类生态生产性土地空间之和; 王家骥等^[35]从自然生态系统演替的角度, 认为生态承载力是自然体系调节能力的客观反映, 是生态系统维持能力和调节能力的限度, 超过这一限度, 自然体系将失去维持平衡的能力, 遭到摧残或归于毁灭, 由高一级别的自然体系(如绿洲)降为低一级别的自然体系(如荒漠); 高吉喜^[30]从可持续发展的角度, 认为控制人类的活动在生态系统承载能力范围之内, 是实现系统和区域可持续发展的最基本和最首要的条件, 他定义生态承载力为生态系统的自我维持与自我调节能力、资源与环境子系统的供容能力及其可维持的社会经济活动强度和具有一定生活水平的人口数量, 该定义可以说是最广泛被接受的, 后来有很多研究沿用此定义或在此基础上加以调整和补充; 金悦等^[36]关注城市生态系统, 认同生态承载力是衡量某一区域可持续发展能力的重要判据, 将城市生态系统分为资源、环境、社会、经济 4 个子系统, 认为生态承载力包含 3 个层面, 即生态系统自我维持与自我调节

表 1 从不同角度出发的生态承载力概念定义和表征方式

年份	角度	概念	表征方式	提出者
1996	资源的有限性	生态系统可以供给内部人口日常生活、生活所需的各类生态生产性土地空间之和	面积	Rees 等 ^[34]
1999	可持续发展	生态系统的自我维持、自我调节的能力, 资源与环境子系统的供容能力, 及其可维系的社会经济活动强度和具有一定生活水平的人口数量。	能力、人口	高吉喜 ^[30]
2000	自然生态系统演替	自然体系调节能力的客观反映, 是生态系统维持能力和调节能力的限度。	能力	王家骥等 ^[35]
2005	生态系统健康	在一定社会经济条件下, 自然生态系统维持其服务功能和自身健康的潜在能力。	能力	杨志峰等 ^[37]
2007	可持续发展	某一特定区域在资源、环境和自然生态因素制约下, 经济发展、资源利用、生态保护和社会文明各个领域均能符合可持续发展管理目标要求的最大人类经济社会发展负荷, 包括人口总量、经济规模及发展速度。	人口、经济规模及发展速度	张林波 ^[29]
2010	生态系统结构和功能	在生态系统结构和功能不受破坏的前提下, 生态系统对外界干扰特别是人类活动的承受能力。	能力	沈渭寿等 ^[38]
2015	可持续发展	生态系统自我维持与自我调节的能力, 生态系统内环境子系统与资源子系统的供容能力, 人类活动和社会经济生产活动对环境、资源子系统带来的压力。	能力、压力	金悦等 ^[36]
2015	生态系统服务	某个区域生态系统的结构、过程及其空间格局决定的生态系统服务所能支撑的具有一定发展水平的人口和经济规模。	人口、经济规模	曹智等 ^[39]
2017	生态系统服务	生态系统提供服务功能、预防生态问题、保障区域生态安全的能力。	能力	徐卫华等 ^[40]

的能力,生态系统内环境子系统与资源子系统的供容能力和人类活动和社会经济生产活动对环境、资源子系统带来的压力;杨志峰等^[37]提出了基于生态系统健康的生态承载力概念,是指在一定社会经济条件下,自然生态系统维持其服务功能和自身健康的潜在能力;沈渭寿等^[38]注重生态系统的结构与功能,将生态承载力定义为在生态系统结构和功能不受破坏的前提下,生态系统对外界干扰特别是人类活动的承受能力;曹智等^[39]基于生态系统服务的理论,提出生态承载力是某个区域生态系统的结构、过程及其空间格局决定的生态系统服务所能支撑的具有一定发展水平的人口和经济规模;徐卫华等^[40]强调生态承载力是指生态系统提供服务功能、预防生态问题、保障区域生态安全的能力。

可见,生态承载力的概念仍在不断发展中,并没有形成一个大家公认的概念,仍有大多数学者认为,生态承载力是在一定时期内,资源、环境子系统对于社会经济活动的承载与支撑能力^[41],生态承载力是资源承载力和环境承载力的综合^[42]。近年来,也有学者提出广义和狭义的资源、环境与生态承载力,并更加关注不同资源种类、环境要素与生态因素等分类评价^[28]。

当前的研究需要和发展方向越来越偏向分类评价。比如,2014 年国家发改委部署开展“资源环境承载能力监测预警指标体系和技术方法”研究项目,其中构建的全国资源环境承载能力预警评价指标体系的基础评价中,分资源类、环境类、生态类指标进行评价^[43-44]。徐卫华等^[40]首次辨析了广义和狭义的生态承载力,认为狭义的生态承载力是指生态系统提供关键的生态服务功能、预防生态问题、保障区域生态安全的能力,而将资源提供相关的功能(如水资源提供等)归为资源承载力,污染物净化功能(如空气质量调节与水质净化等)归到环境承载力。从 2019 年初开始,国家自然资源部多次修订《资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价技术指南(试行)》,其中“生态评价”自始至终都是独立于资源环境承载力评价,进行单独评价。在最新的 2020 年 1 月的试行版中^[45],仍然保留独立的“生态保护重要性评价”,并将其描述为“从区域生态安全底线出发,在陆海全域,评价水源涵养、水土保持、生物多样性维护、防风固沙、海岸防护等生态系统服务功能重要性,以及水土流失、石漠化、土地沙化、海岸侵蚀及沙源流失等生态脆弱性,综合形成生态保护极重要区和重要区”,但是并没有明确指出“生态承载力”的概念,仍然沿用之前的“资源环境承载能力”。

可以看出,在生态承载力的概念发展中,生态承

载力一直与资源、环境承载力相互交叉重叠,并没有相对清晰独立的概念定义,但是关注、辨析独立的生态指标的必要性和需求越来越强,将生态承载力与资源、环境承载力概念分开是必然的发展方向。总结当前最新的研究进展,生态承载力的概念特点应包括:1)针对一定的时空尺度进行描述;2)以人类及人类活动作为承载对象,自然-经济-社会复合生态系统作为承载体;3)注重生态系统保障生态安全,给人类提供生态系统服务功能的能力。本文提出城市生态承载力的定义为:城市生态系统为人类及人类活动提供对于该城市发展关键的支持与调节服务的能力,与资源承载力(资源供给服务提供能力)、环境承载力(污染物稀释净化调节能力)等共同组成城市生态系统综合承载力。

将生态系统服务作为城市生态承载力评价的终点,其主要原因和优势在于:1)生态系统服务具有“系统性”的特点,生态系统服务是生态系统的特征,通过多种生态系统结构和过程之间的相互作用而体现出来,可以用来表征生态系统作为一个结构功能的统一体,在一项或多项区域发展活动作用下的“整体上”受到了何种影响。而利用某一种或几种物理、化学、生物的指标,例如环境质量状况或者某种物种的生存状态都难以体现出生态系统结构和功能的变化。2)生态系统服务是指人类从生态系统中得到的收益,对人类福祉产生重要影响,人类通常会直观地感受到它们的变化。用生态系统服务来表征生态承载力是目前生态承载力研究的趋势。

1.3 承载的三重属性

1.3.1 尊重城市承载力的物理边界 根据热力学第二定律,所有的能量转化都是耗散过程。生产是将原材料转换为产品,并在过程中产生熵(混乱程度)。热力学第二定律指出,所有能量转化过程都将朝着熵增加的方向发展,即从有序到无序^[46]。尽管迄今为止多通过隐喻的方式使用,但是熵的概念也已被应用到城市系统中。例如, Hornborg^[47]认为“工业发展意味着熵的社会转移”。同样, Capra^[46]指出,建立世界秩序总是意味着同时产生熵。当系统将物质或能量释放到环境中时,耗散代谢发生在城市代谢过程中,从而降低了经济系统中的熵水平。城市中的自然系统被用作熵的汇,来平衡系统的熵增,增加系统的可持续性。因此,传统的、简单思维中的承载力提升,实际是通过各种方式来提升城市所能供给的产品(如水、食物等),也同时增加了城市内部的熵值,如果城市内部本身缺乏通过自然等方式抵消过快的熵增,就会增加不可持续的风险。根据最大功率原则,生态系统本身

可能是没有固定的发展目标,但需要找到最佳的方式来调整和响应能量输入的约束。因此,城市的承载力确定,首先需要确定的是其行政边界与时间边界(空间与时间)、物理边界与虚拟边界(资源禀赋与对外贸易)、刚性边界与弹性边界(管理规划与辐射影响)。

1.3.2 理解城市承载力研究的非稳态 生产和消费过程对熵增的提升不是线性的,而是脉动的,在这种情况下使用诸如“平衡”之类的术语可能会造成混淆,因为它暗示了稳定状态,正如 Odum 等^[48]所提出的那样,脉冲模式在实现长期效率和整体生产率平衡方面确实更好,因此,政策需要放弃稳态概念化。在提到“稳步”提升承载力的概念时,“稳步”意味着维持稳定的结构和功能的脉冲“稳态”状态,但其特征是能量和物质流的连续振荡,是一种强调非直线进化、多元理性的城市发展思维模式。城市生态系统是控制论系统,控制论系统是具有反馈的系统。具体而言,它是一类特殊的因果(输入-输出)系统,其中输入至少部分由输出确定。返回到输入的输出部分是反馈,这可能成为反馈控制的基础。根据 Patten 等^[49]的观点,控制论属性是从大型的、复杂的、分散的系统组织中反映出来的。在信息控制下,物质循环和能量流动之间的相互作用会产生自组织反馈。根据 Nielsen^[50]的说法,“至少我们可以说,自然的二阶系统很少完全由外部决定并由外部创造/塑造。这不排除人类通过开发,污染以及对系统的观察(田间和实验室)所施加的影响”。因此,对城市承载力的提升从根本上讲是一个学习过程,其中能量会逐渐聚集,并且具有更长的周转时间、更大的空间规模、更高的维护成本和更大的反馈效果^[51]。通常我们将这一原理描述为城市的承载对象收敛过程。

1.3.3 发掘城市承载力研究的关联性 承载力应有其内核的承载对象,也应有其外延的关联对象。以城市为例,按照人与自然关系来分,可分为自然系统、

社会经济系统和混合系统(包括人工景观、蓝绿基础设施及农田)(表 2),不同子系统功能特点不同,其直接的承载对象也不同。譬如自然系统供给资源(水、矿产等),社会经济系统供给人口(劳力)、GDP 等,混合系统兼顾自然与经济产出,提供粮食、优美的景观及一定的调节服务。而这些不同子系统的供给是存在交叉的,并面向着不同承载对象的需求,而且某些对象还在一些程度上对这些服务供给产生需求上的竞争。例如人口与其他物种对资源供给的竞争,所以人口承载力必然与生态承载力有关联关系。

以城市为例,资源承载力是从城市自然系统中的矿、能、水、土地等的要素视角来分析,面向的需求是人的需求(生存需求)和城市的发展(发展需求),强调的是供给能力,对资源承载力的提升实际是提升城市供需的平衡性;环境承载力是从水、气、声、渣等污染物的视角来分析,面向的需求是人的需求(健康需求),也就是生产与排放的协调,对环境承载力的提升实际是提升城市内部协调性;生态承载力(或者说狭义的生态承载力,而非广义概念)应是系统地考虑城市内的人和其他物种及生物多样性需求(永续性需求),重点强调的是城市自然系统和混合系统中生态产品(生态系统服务)的供给与维持,当然这里的生态产品不仅包括供给服务,还包括调节服务(对损害的缓解)和文化服务(如美学与景观等),对生态承载力的提升实际是提升城市的永续性。

人口承载力和其他承载力例如复合承载力实际是一种综合的承载。以人口承载力为例,承载更多的人是其目标,但并不应仅仅是低生活品质的人口数量的提升,还应包括品质的提升、健康的提升和永续性的提升,这就与资源、环境和生态承载力息息相关。所以当谈及城市承载力下降或城市“病”的出现,归根结底可以概括为“不足、不和、不续”^[52]。不足是指城市供需的时、空、结构等平衡性不足;不和是指城市内部生产、消费与排放的协调性欠缺;不续是指城

表 2 城市的子系统组成及承载特点

系统组成	城市中的自然系统	城市中的混合系统	城市中的社会经济系统
	天然林、草地、湿地等,及矿产、水资源等	农田、人工景观等	工业、三产、居民等
承载对象	自身	人口、经济、环境	人口、经济
	整体	人口、经济	
承载特点	供给	生态产品	工业产品
	需求	人的需求	人、发展的需求
环境影响		产生面源污染或负服务造成损失	排放大量污染物,造成人群健康损害和生态系统损失
支撑的理论基础	生态学理论、热力学理论、环境科学	经济学理论、生态学理论、城市规划	经济学理论

市多样性的永续性和代际永续性断裂。城市的问题不能简单地简化为供给缺失,这其实是城市问题的工具化思维。由于缺少了价值理性的约束与引导,工具理性往往会带来社会发展的严重扭曲,否定高于人的价值标准的存在。因此在工具理性指导下,在城乡发展中生态、社会、城乡等各种失衡现象比比皆是,而城乡规划由于缺少正确的价值引导,往往成为各种失衡问题的助推手。另外,在工具理性的逻辑下,简单理性必然走向直线进化论,因此缺少辩证思维,坚持绝对真理观,导致独断的思维,从而缺少包容性。在城市生态规划中,这必然会导致机械化地认识城市,将城市等同于“住人的机器”,忽略对于城市内部的多样性(其他物种、生态系统服务、生物多样性等)的关注,造成千城一面等问题^[52]。“不足、不和、不续”均会降低复合承载力及对人口的承载能力,也说明对综合承载力的提升,不能简单地考虑成单项供给的增加。

2 城市生态承载力提升的非线性特征

资源承载力与环境承载力的提升趋向于线性,譬如,综合经济-环境会计污染静态模型遵从线性的核算过程,当以特定源污染物排放量作为核算起点时,可以通过建立大气、水体和土壤污染扩散模型,模拟污染物从特定污染源排放后进入不同介质中,达到稳定污染物含量的过程,以确定污染物的含量^[53]。当以地区的污染物含量作为核算起点时,数据通常是根据该地区的环境空气质量监测数据、社区监测数据或通过模型模拟的大气污染物含量替代^[54]。基于静态模型中的影响路径,欧盟委员会资助开发了 ExternE 模型及 Ecosense 软件、USEPA 研发了 BenMap 软件、世界卫生组织欧洲区域办事处欧洲环境与健康中心(ECEH)开发了 AirQ/AirQ+软件等,这些软件被广泛地用于估算各个空间尺度的由大气污染造成的健康和经济损失^[55]。此外,生命周期评价方法通过损害路径把污染物的分析结果追踪量化到了健康、生态系统等损害终点,常使用的方法和数据库有欧洲学者开发的 Eco-indicator 99、ReCiPe,加拿大学者开发的 LUCAS,日本学者开发的 LIME 等^[53, 56-57]。污染物排放的损害,不仅可以像静态模型所考虑的那样对经济产生直接影响,而且会对经济增长产生反馈机制,例如污染物损害的市场损失反过来也会减少生产。污染的综合经济-环境会计动态模型采用可计算一般均衡(CGE)模型,形成闭环的过程,这种模型最近被频繁地用于污染物造成的社会经济成本的估算。比如:Chen 等^[58]利用基于 CGE 模型的综合评估框架,评估

中国经历了令人震惊的 GDP 和福利损失;还有研究将该模型用到了小尺度区域(如省级尺度),Xie 等^[59]在省级层面模拟了实施 PM_{2.5} 污染控制政策前后的治理成本和 GDP 收益对比,发现在污染程度较高、人口分布稠密的地区,控制 PM_{2.5} 污染可以带来积极效益,而欠发达地区的 PM_{2.5} 控制投资高于 GDP 收益。

与资源和环境承载力不同,生态承载力的提升本身是阶梯型,在一个自然环境形成的种群下,只是在一定阈值范围随着资源供给的变化,呈现近似线性的改变。如果资源供给(如调水等)增加足够实现生态系统中物种的演替,会使得城市生态承载力跨上一个台阶,即提升到下一个变化阈值(图 1)。此外,污染物对生态系统的损害,在时间尺度上可以分为瞬时的和漫长的污染生态过程。污染物引起的各种急性中毒反应过程为瞬时污染生态过程,而需要相对长时间表现的毒物稀释过程、慢性中毒过程和污染物生物积累与放大过程等,均属于漫长的污染生态过程^[60]。比如,由温室气体引发的全球气候变化导致陆地和海洋物种的损失,是一种长期的生态系统损害。已经有研究考虑了污染物或相关的环境问题在不同时间尺度上对生态系统的损害。如 Goedkoop 等^[61]通过生命周期评价方法计算了欧洲酸化和富营养化导致的不同时间尺度(20、50、100 和 500 a)的生物多样性损失。生物多样性足迹和 GLOBIO 模型/GLOBIO-Aquatic 模型通过对比未受干扰状态下与受干扰状态下的生态系统的物种丰富度,衡量生态系统的完好程度,衡量了温室气体造成的长期时间尺度的陆地和海洋生态系统的生物多样性损失^[62]。在生命周期评价法中,不同空间尺度的生物多样性损失核算取决于污染物产生的环境效应,与光化学臭氧、陆地酸化、淡水富营养化及气候变化相关的生物多样性损失多以区域视角,即本地区域对一种物种损失的视角^[63]或以全球视角,即考虑全球层面上的物种丰富度进行评估^[64]。然而有学者认为,生物多样性是一种生态系统的特性,核算其价值时应该关注多样性而不是单一特定的物种^[65],因此使用生命周期评价方法核算污染物对生物多样性造成的损失时,应该更关注全球层面。对于污染物,长期和慢性损害也会造成的娱乐、审美和舒适度的价值的损害。这一问题难以在短期内解决,其损害是不可逆转的。例如,2011 年日本福岛核泄漏事故对日本入境旅游造成了致命的破坏,这种情况肯定会长期持续下去^[66]。因此,制定城市生态承载力提升的对策时,需充分考虑其非线性特征,设定合理的阈值以制定提升方案。

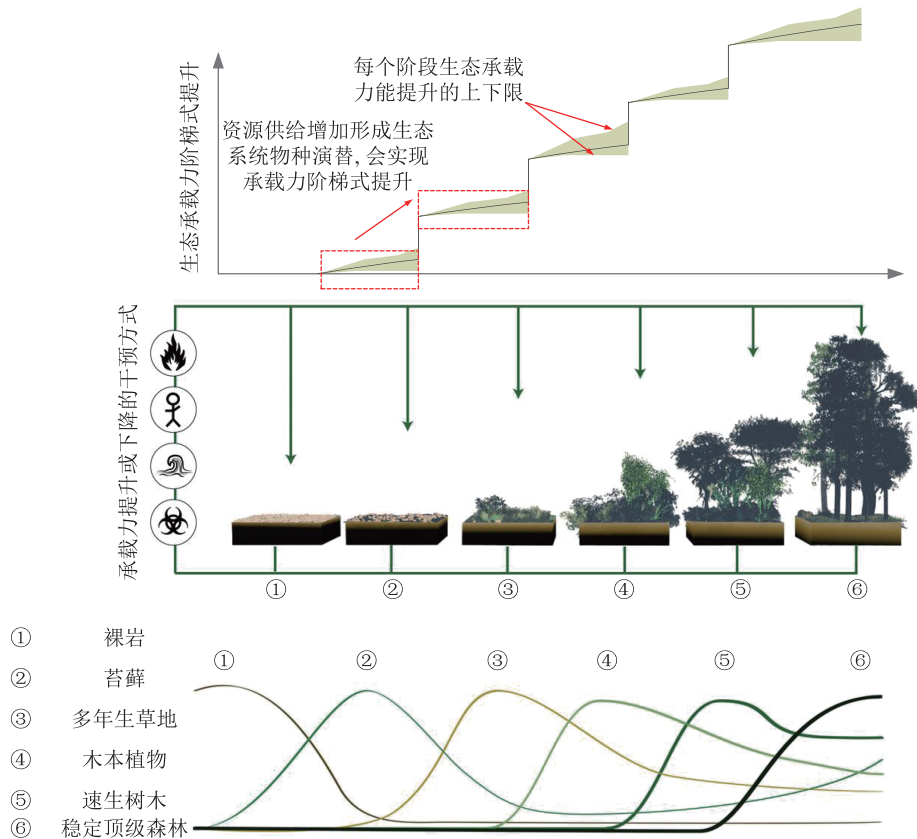


图1 生态承载力提升的非线性特征

3 生态承载力与资源、环境承载力之间的关联关系

生态承载力与资源(能源、水、食物、土地)和环境之间存在着关联(nexus, 也可翻译为耦合、扭结等), 不少文章和案例都证明了这一结论。Bekchanov 等^[67]指出: 生态系统提供食物、水、能源(资源)的同时, 还提供一些调节小气候、预防洪水、空气调节等服务; 因此, 不仅应考虑是否有充足的水量, 而且应考虑是否有适应的水质来满足生态系统的需求; 此外, 农业污染以及某些行业的有毒废水对周围和下游生态系统构成严重威胁, 降低地表水和地下水的质, 并可能损害生态系统功能。Rodríguez-de-Francisco 等^[68]通过哥比亚水电开发工程的研究得出, 筑坝进行水电开发工程可产生清洁能源、调节水流等, 但也极大地影响了大坝周围和下游的经济和社会活动。例如: 大坝的建设直接占用农业用地, 造成粮食减产和当地收入减少; 建设废料倾倒在河流中, 造成环境污染, 直接影响鱼类的生存; 大坝也阻碍了鱼的通过, 造成渔民失业, 水电开发工程同时影响到能源生产、自然资源分配、环境污染以及剥夺当地居民受惠的生态系统服务等。该研究提出“集成”(integration)及综合管理是不可持续资源实践的灵丹妙药。Subedi 等^[69]通过

对尼泊尔食物生产系统的研究, 指出农学研究的进步使粮食系统的生产力提高了近3倍, 满足了不断增长的人口需求。但是, 这些成就付出了巨大的生态代价, 例如生物多样性和农业生物多样性的丧失, 以及水、土地和当地农业基因库(包括其野生亲缘种)等基本自然资源的枯竭。种植多种植物, 例如乔木和灌木, 可以防风、遮荫以及为农作物和牲畜提供庇护, 并通过调节微气候来帮助保持土壤水分。可见生物多样性提供了各种生态系统服务, 并与水-粮食-能源之间紧密联系。Khanna^[70]利用美国的保护性耕作措施论证了农业生产可以同时影响多种生态系统服务, 在改善某些服务的同时可能恶化其他服务, 因此必须考虑结果之间的权衡和协同作用。例如土地种植玉米生产乙醇代替汽油等化石燃料可以减少碳排放, 但玉米种植也会带来土壤碳储量和养分的流失, 而种植多年生能源作物可以提高生物多样性, 同时可以控制地表径流和土壤侵蚀, 减少养分流失, 但多年生作物长期占用土地, 影响了土地的生产效率和农民收入。研究建议利用综合的生物物理模型和经济模型, 用精细的空间分辨率量化土地使用选择对多种生态系统服务的影响能力, 用集成的方法确定是否需要单个或多个方案, 并避免方案之间的重复和冲突。

传统上, 对于应对资源、环境、生态问题的政策

管理是分部门进行解决的,很大程度上忽略了由于另一部门的政策或资源变化对一个部门的影响,然而在一个复杂且相互影响的系统中,不同要素相互联系,存在要素间、部门间协同与权衡,若对这些相互作用与关联关注较少,不仅将影响政策实施的实际成效,

还可能对环境造成严重影响,影响生态系统及其提供的服务^[71].

本研究尝试构建资源、环境、生态不同要素之间的关联关系,探究不同承载力之间的耦合性与带动性(图2).

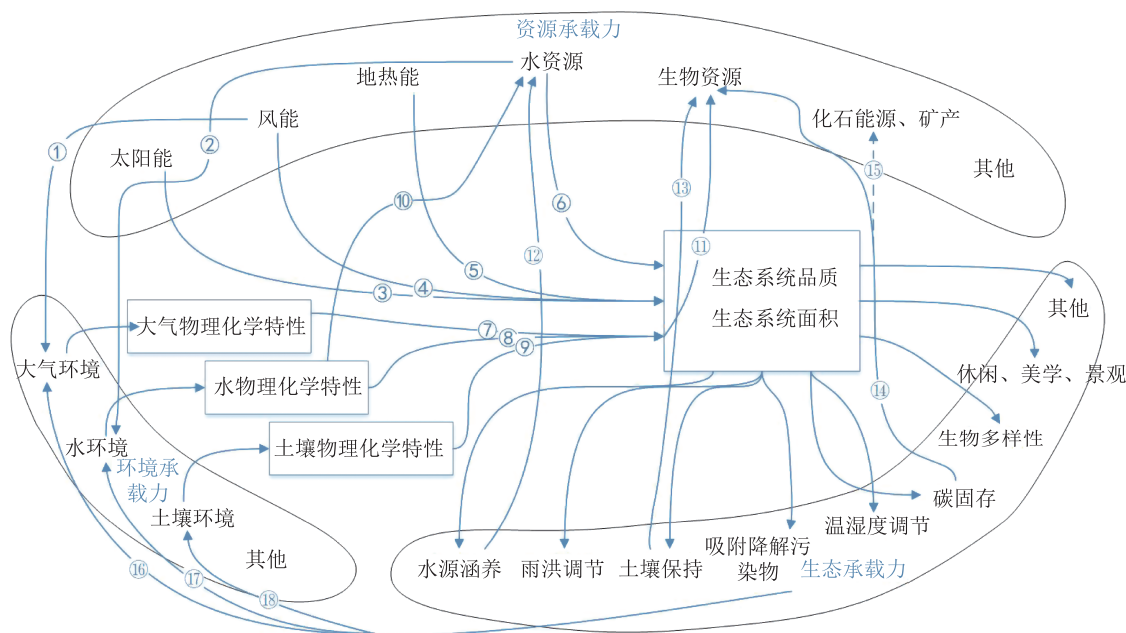


图2 生态承载力与资源、环境承载力之间的关联关系

图2中:①风能资源承载力影响大气环境承载力,风能资源的大小直接影响大气环境稀释容量,从而影响大气环境承载力;②水资源承载力影响水环境承载力,水资源越多,水量越大,水环境容量越大,水环境承载力越大;③太阳能资源承载力通过影响生态系统品质或面积影响生态承载力,到达地表的有效太阳辐射影响着地表植被的生长,植被的长势或面积变化影响生态承载力;④风能资源承载力通过影响生态系统品质或面积影响生态承载力,适宜的风速有利于植物生长发育,有利于花粉、种子传播,还能促使环境中氧、二氧化碳和水汽均匀分布,并加速它们的循环,形成有利于植物正常生活的环境,风力的扩散作用,可降低大气污染对植物的危害。但是长期的单向风使植物迎风方向的生长受抑制,过大的风速造成倒伏、折枝、落花、落果等,对植物造成危害,植被的长势或面积变化影响生态承载力^[72];⑤地热能资源承载力通过影响生态系统品质或面积影响生态承载力,地热区水与土壤温度较高,并且水热蚀变作用影响土壤的酸碱度,使其形成的生态系统营养物质相对贫乏,植物群落结构简单^[73];⑥水资源承载力通过影响生态系统品质或面积影响生态承载力,水资源影响植被生理生长,在我国北方大部分地区潜在自然植被 NPP

与降水量呈现显著正相关^[74],进而影响与 NPP、NDVI 等植被参数有关的生态系统服务功能,例如碳固存、空气净化、生物多样性等,影响生态承载力;⑦大气环境承载力变化改变大气物理化学特性,通过影响生态系统品质影响生态承载力,大气污染对生态系统造成损害,从而影响生态承载力;⑧水环境承载力变化改变水物理化学特性,通过影响生态系统品质或面积影响生态承载力,水污染会对生态系统造成损害,从而影响生态承载力;⑨土壤环境承载力变化改变土壤物理化学特性,通过影响生态系统品质或面积影响生态承载力,土壤污染会对生态系统造成损害,从而影响生态承载力;⑩水环境承载力通过影响可利用的水资源量从而影响水资源承载力,当水污染较严重时,水并不能被用于生产生活,造成水质性缺水;⑪水环境承载力、土壤环境承载力通过影响生态系统的品质和面积影响生物资源承载力,水环境、土壤环境污染影响植物生长,超过植物忍耐限度时,对植物产生损害,影响农作物、木材等生物资源的产量;⑫水源涵养生态承载力通过地下水资源影响水资源承载力,一般认为水源涵养量(TQ)等于下渗量,即为降水量(P)减去径流量(R)和蒸散发(ET)^[40],下渗即能补充地下水资源;⑬土壤保持生态承载力通过影响土地生

产力而影响生物资源承载力,土壤流失会造成土壤肥力下降,降低土地生产力,影响农作物产量^[75],减少人类可利用的生物资源;⑭碳固存生态承载力变化影响生物资源承载力,生态系统的固碳能力增加,净初级生产力增加,增加了例如木材等人类可利用的生物资源;⑮碳固存能力变化影响化石能源的生成(极为缓慢)、影响资源承载力,生态系统固定的碳经过长时间的生化、地质作用,形成煤炭、石油等化石能源,但该过程极为缓慢,在短时间尺度下可忽略不计;⑯空气净化服务生态承载力变化,导致生态系统对大气污染物吸附降解量变化,影响大气环境承载力,生态面积增加对大气污染物的吸附降解量增加,提升大气环境质量,从而提升大气环境承载力;⑰水体净化服务生态承载力变化导致生态系统对水体污染物吸附降解量变化,影响水环境承载力,水生植物、微生物对水体污染物的吸附降解可以提升水环境质量,进而提升水环境承载力;⑱土壤净化服务生态承载力变化,导致生态系统对土壤污染物吸附降解量变化,影响土壤环境承载力,通过植物、微生物对土壤污染物的降解,提升土壤环境质量,进而提升土壤环境承载力。

4 结论

本研究重新梳理了生态承载力的理论基础、研究历程与概念迷思,从系统组成、承载对象、承载供给与需求的特点、环境影响及支撑的理论基础等方面整理了生态承载力的内核,以及与资源、环境承载力和其他复合承载力的差异性。基于现有的生态承载力评价方法,提出了生态承载力提升的非线性特征及与资源、环境承载力之间的关联关系框架。根据当前的城市生态环境问题,研究提出,对城市承载力的提升,应考虑如下3个导向:1)平衡性导向,即通过供需平衡来反映城市生态承载情况,包括总量的平衡性、空间的平衡性、供需的平衡性等;2)协调性导向,即通过生态承载力的提升或降低会带动资源承载力、环境承载力等的上升或下降来评估其带动效果;3)永续性导向,包括自然的永续性(本地的自给率和生物多样性维持)、社会的永续性(生态风险)、人文的永续性(历史传承、独立美学、以人为本)等。在当前合理评价生态承载力、守住生态底线的迫切需求下,对于城市生态承载力的提升,应尊重自然规律的理性特质,尊重整体秩序的理性特质,尊重代际演化的理性特质,不应简单考虑其工具属性^[76],并且随着城市发展所产生的新的问题,需进一步考虑其生态学机制与承载力需求,通过复杂耦合思维考虑承载力关联关系中的物理互动和有效决策的联动管理。

5 参考文献

- [1] GROOTEN M, ALMOND R E A. Living planet report-2018: aiming higher[R/OL]. [2021-06-01]. <https://www.worldwildlife.org/pages/living-planet-report-2018>
- [2] XUE Q, SONG W, ZHANG Y L, et al. Research progress in ecological carrying capacity: implications, assessment methods and current focus[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2017, 8(5): 514
- [3] 徐琳瑜, 杨志峰. 城市生态系统承载力[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2011
- [4] 李赞凯, 闫慧敏, 董昱, 等. “一带一路”地区生态承载力评估系统设计与实现[J]. *地理与地理信息科学*, 2020, 36(2): 47
- [5] 陈伟莲, 张虹鸥, 李升发, 等. 新时代资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价思考: 基于广东省评价实践[J]. *广东土地科学*, 2019, 18(2): 4
- [6] BARLES S. Society, energy and materials: the contribution of urban metabolism studies to sustainable urban development issues[J]. *Journal of Environmental Planning and Management*, 2010, 53(4): 439
- [7] HABERL H, FISCHER-KOWALSKI M, KRAUSMANN F, et al. Progress towards sustainability? What the conceptual framework of material and energy flow accounting (MEFA) can offer[J]. *Land Use Policy*, 2004, 21(3): 199
- [8] BROWN J H, GILLOOLY J F, ALLEN A P, et al. Toward a metabolic theory of ecology[J]. *Ecology*, 2004, 85(7): 1771
- [9] CONAN M. Environmentalism in landscape architecture[M]. Washington D C: Dumbarton Oaks Research Library and Collection, 2000
- [10] ODUM H T. Energy basis for man and nature[M]. New York: McGraw-Hill, 1981
- [11] BETTENCOURT L M A, LOBO J, HELBING D, et al. Growth, innovation, scaling, and the pace of life in cities[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(17): 7301
- [12] OLIVER-SOLÀJ, NÚÑEZ M, GABARRELL X, et al. Service sector metabolism: accounting for energy impacts of the montjuic urban park in Barcelona[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2007, 11(2): 83
- [13] 姜仁荣, 刘成明. 城市生命体的概念和理论研究[J]. *现代城市研究*, 2015, 30(4): 112
- [14] WOLMAN A. The metabolism of cities[J]. *Scientific American*, 1965, 213: 179
- [15] CÉSPEDES RESTREPO J D, MORALES-PINZÓN T. Urban metabolism and sustainability: precedents, genesis and research perspectives[J]. *Resources, Conservation and*

- Recycling, 2018, 131: 216
- [16] ODUM H T, ODUM E C. Energy Basis for Man and Nature[M]. New York: McGraw-Hill, 1976
- [17] IRWIN E G, JAYAPRAKASH C, MUNROE D K. Towards a comprehensive framework for modeling urban spatial dynamics[J]. Landscape Ecology, 2009, 24(9): 1223
- [18] BARABÁSI A L, ALBERT R. Emergence of scaling in random networks[J]. Science, 1999, 286(5439): 509
- [19] MITCHELL S D. Unsimple truths: science, complexity and policy[M]. Chicago: University of Chicago Press, 2009
- [20] 赵东升, 郭彩霞, 郑度, 等. 生态承载力研究进展[J]. 生态学报, 2019, 39(2): 399
- [21] PARK R E, BURGESS E W. Introduction to the Science of Sociology[M]. Chicago: University of Chicago Press, 1921
- [22] ODUM E P. Fundamentals of ecology[M]. Philadelphia: W B Saunders Company, 1953
- [23] YOUNG C C. Defining the range: the development of carrying capacity in management practice[J]. Journal of the History of Biology, 1998, 31(1): 61
- [24] CLARKE A L. Assessing the carrying capacity of the Florida keys[J]. Population and Environment, 2002, 23(4): 405
- [25] PEARL R. The biology of population growth[M]. New York: Alfred A Knopf, 1925
- [26] CURRAN S, KUMAR A, LUTZ W, et al. Interactions between coastal and marine ecosystems and human population systems: perspectives on how consumption mediates this interaction[J]. AMBIO: A Journal of the Human Environment, 2002, 31(4): 264
- [27] 陈先鹏, 方恺, 彭建, 等. 资源环境承载力评估新视角: 行星边界框架的源起、发展与展望[J]. 自然资源学报, 2020, 35(3): 513
- [28] 封志明, 李鹏. 承载力概念的源起与发展: 基于资源环境视角的讨论[J]. 自然资源学报, 2018, 33(9): 1475
- [29] 张林波. 城市生态承载力理论与方法研究: 以深圳为例[D]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2007
- [30] 高吉喜. 区域可持续发展的生态承载力研究[D]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 1999
- [31] 向芸芸, 蒙古军. 生态承载力研究和应用进展[J]. 生态学杂志, 2012, 31(11): 2958
- [32] FENG Z M, SUN T, YANG Y Z, et al. The progress of resources and environment carrying capacity: from single-factor carrying capacity research to comprehensive research[J]. Journal of Resources and Ecology, 2018, 9(2): 125
- [33] 徐琳瑜, 杨志峰, 李巍. 城市生态系统承载力研究进展[J]. 城市环境与城市生态, 2003, 16(6): 60
- [34] REES W, WACKERNAGEL M. Urban ecological footprints: why cities cannot be sustainable—and why they are a key to sustainability[J]. Environmental Impact Assessment Review, 1996, 16(4/5/6): 223
- [35] 王家骥, 姚小红, 李京荣, 等. 黑河流域生态承载力估测[J]. 环境科学研究, 2000, 13(2): 44
- [36] 金悦, 陆兆华, 檀菲菲, 等. 典型资源型城市生态承载力评价: 以唐山市为例[J]. 生态学报, 2015, 35(14): 4852
- [37] 杨志峰, 隋欣. 基于生态系统健康的生态承载力评价[J]. 环境科学学报, 2005, 25(5): 586
- [38] 沈渭寿, 张慧, 邹长新, 等. 区域生态承载力与生态安全研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2010
- [39] 曹智, 闵庆文, 刘其承, 等. 基于生态系统服务的生态承载力: 概念、内涵与评估模型及应用[J]. 自然资源学报, 2015, 30(1): 1
- [40] 徐卫华, 杨琰琰, 张路, 等. 区域生态承载力预警评估方法及案例研究[J]. 地理科学进展, 2017, 36(3): 306
- [41] 叶菁, 谢巧巧, 谭宁焱. 基于生态承载力的国土空间开发布局方法研究[J]. 农业工程学报, 2017, 33(11): 262
- [42] 廖慧璇, 籍永丽, 彭少麟. 资源环境承载力与区域可持续发展[J]. 生态环境学报, 2016, 25(7): 1253
- [43] 樊杰, 王亚飞, 汤青, 等. 全国资源环境承载能力监测预警(2014版)学术思路与总体技术流程[J]. 地理科学, 2015, 35(1): 1
- [44] 樊杰, 周侃, 王亚飞. 全国资源环境承载能力预警(2016版)的基点和技术方法进展[J]. 地理科学进展, 2017, 36(3): 266
- [45] 自然资源部. 资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价指南(试行)[A/OL]. (2020-01-19)[2021-06-01]. <http://www.fqghj.net/upload/2020/8/19/4cd280d9-bf78-4b73-aa17-0022d5887bb9/ac179661-ddc8-4e37-87f5-ccc05487bca4.pdf>
- [46] CAPRA F. The web of life: a new scientific understanding of living systems[M]. New York: Anchor Books, 1996
- [47] HORNBERG A. Introduction: conceptualizing sociological systems[M]// HORNBERG A, CRUMLEY C. The world system and the earth system. Global Socioenvironmental Change and Sustainability Since the Neolithic. Walnut Creek, California: Left Coast Press, 2001
- [48] ODUM H T, ODUM E C. A prosperous way down: principles and policies[M]. Colorado: University Press of Colorado, 2001
- [49] PATTEN B C, ODUM E P. The cybernetic nature of ecosystems[J]. The American Naturalist, 1981, 118(6): 886
- [50] NIELSEN S N. Second order cybernetics and semiotics in ecological systems: where complexity really begins[J]. Ecological Modelling, 2016, 319: 119

- [51] ABEL T. Emergy evaluation of DNA and culture in 'information cycles'[J]. *Ecological Modelling*, 2013, 251: 85
- [52] 吴志强, 李欣. 城市规划设计永续理性[J]. *南方建筑*, 2016(5): 4
- [53] GOEDKOOPE M, SPRIENSMA R. The eco-indicator 99: a damage oriented method for life cycle impact assessment[EB/OL]. [2021-06-01]. https://pre-sustainability.com/legacy/download/EI99_annexe_v3.pdf
- [54] MO Y, LI N, XU C Y, et al. Review of survey method for human time-activity pattern and its application in the exposure assessment of air pollutants[J]. *Chinese Journal of Preventive Medicine*, 2018, 52(6): 675
- [55] TURTÓS CARBONELL L, MENESES RUIZ E, SÁNCHEZ GÁCITA M, et al. Assessment of the impacts on health due to the emissions of Cuban power plants that use fossil fuel oils with high content of sulfur. Estimation of external costs[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(10): 2202
- [56] HUIJBREGTS M A J, STEINMANN Z J N, ELSHOUT P M F, et al. ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2017, 22(2): 138
- [57] SABEEN A H, NOOR Z Z, NGADI N, et al. Quantification of environmental impacts of domestic wastewater treatment using life cycle assessment: a review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 190: 221
- [58] CHEN S M, HE L Y. Welfare loss of China's air pollution: How to make personal vehicle transportation policy[J]. *China Economic Review*, 2014, 31: 106
- [59] XIE Y, DAI H C, DONG H J, et al. Economic impacts from PM_{2.5} pollution-related health effects in China: a provincial-level analysis[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(9): 4836
- [60] 周启星, 孙铁珩. 污染生态化学: 现状与展望[J]. *应用生态学报*, 2000, 11(5): 795
- [61] GOEDKOOPE M, HEIJUNGS R, HUIJBREGTS M, et al. ReCiPe 2008: a life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level[EB/OL]. [2021-06-01]. https://www.rivm.nl/sites/default/files/2018-11/ReCiPe%202008_A%20lcia%20method%20which%20comprises%20harmonised%20category%20indicators%20at%20the%20midpoint%20and%20the%20endpoint%20level_First%20edition%20Characterisation.pdf
- [62] JANSE J H, KUIPER J J, WEIJTERS M J, et al. GLOBIO-Aquatic, a global model of human impact on the biodiversity of inland aquatic ecosystems[J]. *Environmental Science & Policy*, 2015, 48: 99
- [63] ASSELIN A, RABAUD S, CATALAN C, et al. Product biodiversity footprint: a novel approach to compare the impact of products on biodiversity combining life cycle assessment and ecology[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 248: 119262
- [64] VERONES F, HELLWEG S, AZEVEDO L B, et al. LC-Impact Version 0.5: a spatially differentiated life cycle impact assessment [EB/OL]. [2021-06-01]. <http://www2.mst.dk/udgiv/Publications/2005/87-7614-579-4/pdf/87-7614-580-8.pdf>
- [65] BARTKOWSKI B. Are diverse ecosystems more valuable? Economic value of biodiversity as result of uncertainty and spatial interactions in ecosystem service provision[J]. *Ecosystem Services*, 2017, 24: 50
- [66] SUN J K, ZHANG J H, WANG C, et al. Escape or stay? Effects of haze pollution on domestic travel: comparative analysis of different regions in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 690: 151
- [67] BEKCHANOV M, RINGLER C, MUELLER M. Ecosystem services in the water-energy-food nexus[J]. *Change and Adaptation in Socio-Ecological Systems*, 2015, 2(1): 103
- [68] RODRÍGUEZ-DE-FRANCISCO J C, DUARTE-ABADÍA B, BOELENS R. Payment for ecosystem services and the water-energy-food nexus: securing resource flows for the affluent?[J]. *Water*, 2019, 11(6): 1143
- [69] SUBEDI R, KARKI M, PANDAY D. Food system and water-energy-biodiversity nexus in Nepal: a review[J]. *Agronomy*, 2020, 10(8): 1129
- [70] KHANNA M. Nexus between food, energy and ecosystem services in the Mississippi River basin: policy implications and challenges[C]//Agricultural & Applied Economics Association. Chicago: Choices, 2017, 32(4): 1
- [71] VAN DEN HEUVEL L, BLICHARSKA M, MASIA S, et al. Ecosystem services in the Swedish water-energy-food-land-climate nexus: anthropogenic pressures and physical interactions[J]. *Ecosystem Services*, 2020, 44: 101141
- [72] 汤军. 风对植物生产的影响[J]. *黑龙江科技信息*, 2015(8): 14
- [73] 周左萍. 云南洱源地热生态系统中真菌多样性、热适应性及其系统发育关系研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2014
- [74] 任正超, 朱华忠, 史华, 等. 中国潜在自然植被NPP时空分布格局变化及其对气候和地形的响应[J]. *草地学报*, 2017, 25(3): 474
- [75] 刘宝元, 毕小刚, 符素华, 等. 北京土壤流失方程[M]. 北京: 科学出版社, 2010
- [76] 吴志强. 城市规划需要精准理性支撑[N]. *滨海时报*,

2018-04-03(8)

Theory and improvement pathway of urban ecological carrying capacity: historicity, nexus and nonlinearity

LIU Gengyuan^{1,2)†} WANG Xueqi^{1,3)} WANG Xuanhua⁴⁾ YANG Qing⁵⁾ CHEN Yu¹⁾

(1) State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, School of Environment,
Beijing Normal University, 100875, Beijing, China;

2) Beijing Engineering Research Center for Watershed Environmental Restoration & Integrated Ecological Regulation, 100875, Beijing, China;

3) Public Meteorological Service Center, China Meteorological Administration, 100081, Beijing, China;

4) School of Public Administration and Policy, Renmin University of China, 100872, Beijing, China;

5) Key Laboratory for City Environmental Safety and Green Development of the Ministry of Education, Institute of Environmental
and Ecological Engineering, Guangdong University of Technology, 510006, Guangzhou, Guangdong, China)

Abstract How to coordinate urban sustainable development with urban ecological carrying capacity is not only related to destiny of a city, but also related to whether surrounding areas can successfully achieve a goal of high-quality and sustainable development. In this study concept and misconceptions of ecological carrying capacity are reorganized, and characteristics of ecological carrying capacity are summarized from aspects of system composition, carrying objects, carrying features of supply and demand, environmental impact and theoretical basis. Differences between ecological carrying capacity and resource carrying capacity, environmental carrying capacity and other composite carrying capacity are clarified. Existing evaluation methods of ecological carrying capacity is used to propose a nexus framework of correlations among ecological carrying capacity, resource carrying capacity and environmental carrying capacity. Correlation methods are developed to quantify coupling and movement of ecological carrying capacity. It is found that coordination between horizontal (sectoral) and vertical (cross-scale) aspects should be fully considered when government policy is adopted to improve ecological carrying capacity.

Keywords ecological carrying capacity; nexus; nonlinearity; capacity improvement; urban system

【责任编辑: 武 佳】