

城市尺度下生态系统服务流研究综述

张 潇¹, 路 青²

(1. 北京大学建筑与景观设计学院, 北京 100871;

2. 北京大学城市与环境学院, 北京 100871)

摘 要: 文章通过对城市尺度范围生态系统服务流的研究进行综述, 分析2种服务流理解下的服务类型研究重点及进展; 基于2种理解将现有研究进行分类, 在服务类型和现有的相关模型及软件上加以区分; 对2种理解下生态系统服务流的研究进行总结分析及评述。最后, 预测了服务流相关的未来研究方向, 为今后规划及城市生态学研究提供参考。

关键词: 生态系统服务流; 城市环境; 生态规划; 人类福祉; 服务供需

中图分类号: X171.1

文献标志码: A

DOI: 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2020.06.010

Review of Ecosystem Service Flow in the Urban Scale

ZHANG Xiao¹, LU Qing²

(1. College of Architecture and Landscape, Peking University, Beijing 100871, China;

2. College of Urban and Environmental Science, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: In this paper, the research on the service flow of urban scale ecosystem is summarized and the key research areas and the progress of the service types under the understanding of the two kinds of service flows are analyzed. Moreover, the existing research is classified based on the two understandings, and distinguished in terms of the service types and the related model and software. The research of the ecosystem service flow under the two understanding is analyzed. The future research directions related to this aspect are proposed as a reference for the future planning and the urban ecology research.

Keywords: Ecosystem Service Flow; Urban Environment; Ecological Planning; Human Welfare; Service Supply and Demand

CLC number: X171.1

城市生态系统维持着城市资源的分配与供给, 决定了城市居民生活质量和人类福祉的可持续发展。近年来, 随着城市人口及建设规模的增长, 城市生态系统日益受到人类活动的影响, 生态系统服务供需关系日趋紧张。这种紧张关系不仅体现在总量上, 也体现在城市各区域所需要的生态系统服务类型及价值量与其供给要素的时空分布之间的差异上, 由此引出了生态系统服务流问题。生态系统服务流考虑了上述时空差异, 从人类需求出发, 研究生态系统服务的供给、需求和流向, 有助于校正传统生态系统服务价值评估中人口密集区(如城市)生态系统服务价值严重低估问题^[1-2], 更加精准地量化生态系统服务价值, 服务于更加合理的生态规划与修复目标。

1 相关概念及背景

1.1 生态系统服务

生态系统服务最初来自于“自然的服务”这一概念^[3], 在1981年被正式提出^[4]。生态系统服务是指“生态系统与生态过程所形成及所维持的人类赖以生存的自然环境条件与效用^[5]”。联合国千年生态系统评估(The Millennium Ecosystem Assessment)中将生态系统服务分为4个类型, 分别为: ①支持服务: 根本性的保障, 如维持地球生命生存环境的养分循环等; ②调节服务: 涉及区域尺度及人类群体面较大, 如气候调节、空气和水循环等; ③文化服务: 当地居民与个体尺度, 如开放空间可视域, 娱乐与生态旅游等; ④供给服务: 涉及尺度较小, 如淡水资源、食物与纤维等^[6]。

收稿日期: 2020-03-17

作者简介: 张 潇(1995-), 女, 硕士研究生。研究方向: 景观生态规划。E-mail: zhangxiaogzj@qq.com

引用格式: 张 潇, 路 青. 城市尺度下生态系统服务流研究综述[J]. 环境保护科学, 2020, 46(6): 55-63.

由于生态系统服务具有复杂性、多样性和空间异质性^[7],从多尺度研究和评估生态系统服务已成为近年来的研究重点之一^[8-9]。其中,大尺度的生态系统服务研究从生态过程到格局已经有较为详细的研究和方法,例如针对国土尺度的生态安全格局及对区域的生态基础设施研究等^[10];但在城市等中小尺度上,由于城市生态系统本身的复杂性,及时空数据精度的限制,当前城市尺度的生态系统服务价值评估还集中于对总量的计算^[11],对城市尺度下具体的服务类型及城市体量、形态和结构等因素对生态服务供给的影响研究仍较为匮乏。研究城市尺度下的生态系统服务及生态过程,有助于协调城市生态要

素的合理分配,为城市居民的生活质量和需求提供科学保证,使基础设施等配置更好地服务于城市规划。

1.2 生态系统服务流

生态系统服务流的概念目前还没有统一的定义。学术界对于生态系统服务流通常有两种理解,一是着眼于从生态系统到人的需求的过程^[12],也就是从供给端到需求端之间的时空连接,其研究重点在于服务的产生、流量、流向和过程的耗散及消费,目的在于能够通过掌握过程而实现对需求更好地分配;二是着眼于生态系统服务的实际供给,是生态系统服务从供给区到受益区的中间过程^[13],具体差异见表 1。

表 1 对服务流的 2 种理解区分

差异类型	强调过程的服务流概念	强调最终效用的服务流概念
研究对象	生态系统服务的产生、流量、流向和过程的耗散和最终的消费	生态系统能量流与生态系统服务关系
构成要素	生态系统的源、汇、用	接收系统、发送系统和溢出系统
研究目的	通过刻画流路径,明确流的方向及耗散状态,实现对过程的控制	通过定量分析各个实体,明确供需关系,实现对实际需求的供应调节
研究重点	流路径,汇的区域位置及影响	供需关系,实际受益的量
代表模型	集成分布式模型;服务路径网络模型 (SPANs),如AIRES, SWAT等	集成空间显性生态系统服务评估模型,如ESTIMAP等

对服务流的第一种理解着重于对过程的分析,明确生态系统服务的传递路径,不少研究者以此概念为基础,对生态系统服务流进行刻画,并给出空间上的分布图。目前基于第一种理解的研究更多集中于对少部分服务的研究,并且受到尺度和内容的限制,更多以自然要素和人流为研究对象,其过程较为复杂,数据要求较高,目前的研究及技术方法较多,但缺乏普遍适用性。

对于服务流的第二种理解,将整个服务流简化为输入到输出的过程,明确在这个过程中的消耗及消费情况,考虑受益者及受益区的供需关系,并将其量化出来。这种方式对数据及研究过程的要求相较第一种方法较低,对关系分析的深入度大于对量化制图的研究。因此适合部分研究整体供需关系的地域,涉及的服务类型也更加多样。

1.3 城市尺度下生态系统服务问题及特征分析

随着城市化建设的增加,高强度资源开发已经造成了一系列资源破坏^[14-15],城市的环境保护依赖

城市生态系统的良性循环,城市生态系统也是连接人类与环境的重要桥梁。生态系统服务流能够有效耦合具有空间异质性特征的生态系统服务的供需^[16],从生态系统服务流的角度进行城市生态系统评估,是目前城市生态学研究的重要一环。

1.3.1 中小尺度下生态服务供需不平衡 生态系统服务的供需具有明显的尺度效应。生态系统所产生的总价值量与人类所需要的生态供给并不完全匹配,这种时空错位的现象在中小尺度上尤为明显。总体来说,中小尺度指较小的空间范围及较短的时间间隔^[17],生态系统服务具有时空动态性,这种动态的变化让生态系统服务流极度依赖时空的改变而发生变化。因此,探讨不同尺度下的生态系统服务价值尤为重要。

生态系统服务价值评估在各个尺度都有相应的研究。全球尺度上, SERNA-CHAVEZ et al^[18] 通过分析供需区域之间的空间服务流,得出实际流的收益,从而评估生态系统服务流价值;区域尺度上, VALLECILLO et al^[19] 于自然要素的成本距离法及

输入人类偏好,量化评估了欧洲生态系统文化服务的价值;单个生态系统尺度上,QIN et al^[20]基于 SPANs 模型构建了水安全评估框架,将生态系统服务评估纳入其中,分析模拟水安全状况。不同尺度下具有生态系统服务的价值评估方法,在城市区域,由于人类的集聚而带来的生态服务需求增多,对供需在空间上的不匹配则更为显著。这种供需不匹配必然导致生态系统服务的供应沿着特定的路径和方向进行流动,研究流动的过程及路径成为分析生态系统服务供需关系的重要一环。

1.3.2 城市尺度下的生态系统服务流特征 在城市尺度下,根据范围和人流量的特征不同,本文将城市环境的尺度研究进行细分:城市群—大都市区—中心城区—街区—公共空间。在不同尺度下,生态

系统服务的流具有不同的意涵。总体来讲分为 3 类:(1)大都市区及城市群:大型城市群地区的生态服务流动会以不同区域的形式计算阈值,该尺度的特点是确立有效界限为行政边界(多以区域经济发展为参照因素),在计算和分析生态系统服务及流的特征时集中于几种特定服务类型,对土地利用类型及生物活动环境阻力依赖度高^[21];(2)中心城区及街区:该区域范围内生态服务价值在空间分布上具有明显的集聚性,以不同土地类型特征及地形起伏特征的生态系统服务价值差异划分^[22];(3)公共空间:该尺度更多考虑覆被的变化。由于城市环境是由人主导的,城市环境下的主导生态过程及生态系统服务类型也有相应的差别。其定义及服务类型差别见表 2。

表 2 生态系统服务流研究城市细分尺度

范围	定义	尺度范围	服务表现形式	服务提供途径	案例地
城市群	3个以上的城市集群	区域及以上	以行政边界为界限,行政中心为“源”地。服务类型集中于调节服务的气候调节、水文调节、支持服务中的土壤保持和养分循环等 ^[23]	文化服务:道路(铁路、国道、省道等) 调节服务:河流水系	京津冀城市群 ^[24-26,16]
大都市区	大的城市人口核心区域	1 h通勤圈		文化服务:道路(省道、街道等)调节服务:河流水系、水利系统	厦漳泉地区 ^[27-29]
中心城区(县)	城市主城区及周边核心组团	30 min通勤圈	以区域或组团边界为界限,研究集中于水调节、土壤保持和初级生产力等在城市尺度权衡关系明显的类型	供给服务:河流水系,农田 调节服务:道路,绿地系统,水系	重庆市巫山县 ^[30-31]
街区(区域)	街道围绕区块	10 min通勤圈			刚察县土地整治地块 ^[32] ;钱江源国家公园体制试点区 ^[33]
公共空间	公众使用户外开放空间	5 min内步行范围	以公园绿地边界为界限,研究多集中于文化服务(开放空间可达性、美学等)、调节服务(水调节、微气候调节)	文化服务:道路 调节服务:绿地、水流、植被	吴淞炮台湾湿地公园 ^[34]

2 国际国内研究进展

基于生态系统服务流的对流的过程以及效用的两种理解方式,本文从生态系统服务流类型及所用的模型软件两方面梳理了近年来国内外相关研究进展,并加以评述。

2.1 城市生态系统服务流:四大服务类型的研究进展

四大生态系统服务类型在源、汇、用上涉及的主体不同,模型构建及对流的分析也各有差异。在城市尺度下的生态系统服务在四大服务流类型上的侧重各有不同,具体见表 3。

2.1.1 调节服务流 城市调节生态系统服务包括气候调节、水质净化、噪音调节、极端气候调节、径

流调节和废弃物处理等^[2]。调节服务流的衡量通常以衡量生态系统对人类有利的方式改变环境条件的能力(例如减少洪水风险)为评价标准^[35]。调节系统服务流研究中,水(雨洪)调节的研究较为丰富,按照对服务流的 2 种理解,分别从对水流过程路径分析和调研水的供需关系 2 个方面进行研究。对过程路径的分析方面,主要着眼于模型的构建及情境设置。如 QIN et al^[20]则直接通过服务路径属性网络及 LCM 模型构建用水及供水场景,通过生态系统服务流框架进行水安全评估。在情境设置方面,ZANK et al^[29]研究了城市扩张情境下对包括供水调节服务流在内的 5 种服务流的影响及变化,GOLDENBERG et al^[36]研究了不同承载体情况下服务的供需差异及流的变化。

表 3 服务类型分类总结

服务类型	研究尺度	研究重点	案例地
调节服务	区域-县域	气候调节、水（雨洪）调节	欧洲：欧洲大陆；瑞典斯德哥尔摩地区 美洲：美国华盛顿 其他：地中海小岛国家
供给服务	区域-县域	食物、水源、木材及基因资源供应	欧洲：莱比锡东部地区 其他：地中海小岛国家 欧洲：各国尺度
文化服务	街道-社区-区域	娱乐与生态旅游、精神与宗教、审美体验和灵感、教育、文化遗产	美洲：华盛顿 亚洲：京津冀城市群 其他：地中海小岛国家
支持服务	区域-县域	初级生产力、营养循环与水循环过程	美洲：华盛顿

除了雨洪调节,气候调节也是调节服务流研究重点。气候调节是指调节全球温度、降水及其他生物参与调节的全球和区域气候过程,尺度效应对气候调节服务流的影响也更为明显。城市尺度下的生态服务流研究着重于研究区域气候调节路径、生态要素及评估手段。气候调节服务的路径大多为城市通风走廊,目前有研究分析了由植物构建出的绿化通风走廊对于城市社区范围的降温效应明显^[37],因此,通风走廊的规划设计与需求分析^[38]也是今后气候调节服务流的研究重点。近年来,欧洲学者也对气候调节服务研究较多,关于气候调节的供需平衡问题也得到重视。如 SERNA-CHAVEZ et al^[18]根据供给区与需求区之间的空间联系提出了通用框架,着重分析了包括气候调节服务在内的 3 种服务。GOLDENBERG et al^[36]针对瑞典斯德哥尔摩地区考虑其气候调节服务的供需平衡。

从有关调节服务的相关研究来看,基于过程的服务流刻画研究较多,其中,对水及空气的流动过程研究较为丰富,其原因方向明确,有一定规律可循,并且数据较容易获取,有助于量化制图。对噪音调节剂废弃物处理等的研究较少,在城市尺度下也有重点研究的必要,可以作为今后研究的方向之一。

2.1.2 文化服务流 文化系统服务流的研究也集中于 2 个方面:一是基于模型方法对文化服务流的分析,一方面是着眼于流的过程,直接分析供应、需求和流量。HE et al^[39]通过最大熵模型,测量并绘制了关于美学和休闲方面的文化生态系统服务供应。另一方面是将流理解为实际的“用”,也就是需求,通过生态系统服务地图工具 (ESTIMAP) 中基于自然的休闲模式的改编版本进行建模;通过居民数量及需求类型量化服务需求,最后通过统计表量

化出实际的流。二是采用新的技术,本质上也是追踪流的动向,利用大数据如手机信令 CDR 数据^[40]等进行人群流向分析,可以快速对文化系统服务流的路径、方向及流量有更精确实时的了解,从而达到评估和提升文化系统服务流的目的,更好地指导规划^[41]。

文化系统服务流的研究经历了一个阶段,就是大数据带来的研究思路和方向的转变。一开始针对文化服务流的研究更多是基于第二种理解,明确源和汇,对其进行供需关系的评估,因为当时对文化系统服务的流的过程参与要素的模糊及人的主观评判性较强。随着大数据的发展,研究可以跟踪使用者的行走轨迹及对场地的使用次数进行评判,对研究文化系统服务流是一次技术上的飞跃。因此,目前很多研究也针对人流轨迹及手机信令数据对服务流进行跟踪和空间路径量化,可以预计随着技术的发展,此类研究还会继续增加。

2.1.3 供给服务流 供给服务流的研究目前分为两大方向:一是针对不同的供给服务研究空间地域的供需关系,设置情境或分析因素对供需关系的影响,从而实现供给服务评估的量化。如 QIN et al^[20]分析了水供应的供需关系,以长期平均地下水回灌率作为供应,以地下水年抽取量为需求,计算了食物、水和能源供给服务的供需比,并通过计算功能梯度,实现了供给服务价值流的核算;二是提出新的评估框架,在考虑必要影响因素的情况下对不同供应服务进行评估。如 SERNA-CHAVEZ et al^[18]提出一种通用框架,分析供给区与受益区的空间联系,引入指标显示供需比;BALZAN et al^[42]开发了不同的空间模型,对生态系统服务容量和流量指标进行了关联分析和束分析,从而确定供应服务于土地利用强度之间的联系。供给服务流的研究一般

以明确其供需关系为研究目的,更多的是计算生态系统服务总量及分析城市供需平衡一类问题,对流的过程刻画相关研究较少。

2.1.4 支持服务流 城市中的支持服务流是为城市提供生物生境、生物多样性、生物地球化学循环及传粉与能量传播的过程。支持服务流包括土壤形成过程、光合作用、初级生产力、营养循环与水循环过程。支持服务流相较于其他服务流而言受尺度影响更小,因此针对支持服务的尺度效应研究有限^[43]。其中,初级生产力^[44]存在较为明显的尺度效应,随着尺度的增加,净初级生产力的均值上涨,但其相关的流动路径研究尚不明确。根据目前有关初级生产力的生态要素的研究^[45],土地植被类型为关键因素,因此其流动性较弱。水循环依靠河流水系实现流动,在城市中,还有部分城市管网参与,构成城市水循环系统服务流的一部分。

2.2 城市生态系统服务流相关软件应用进展

随着计算机模型及 3S 技术的进步,基于生态系统服务流的原理对生态系统服务流进行定量化及模拟的研究增多。根据服务流的 2 种概念基础,分为着眼于刻画流过程的方法及软件与着眼于计算最终服务供给的方法及软件。在 2 种概念之下,在不同尺度下各类方法及软件的功能也有所差异。生态系统服务流的过程刻画类软件有 3 个方面特征:一是研究以生态要素为主体开发空间分布式模型,城市尺度的生态要素选择与人类的需求息息相关,如水、空气等;二是进行服务流的空间刻画及对生态系统服务的评估与测算,体现在模型的空间显性及对价值的测度上;三是对数据的要求较高,多数模型需要大量基础数据作为支撑,用经验公式或设置复杂参数等方式进行计算,限制了部分地区的研究及模型推广使用。具体软件特征及对比见表 4。

表 4 刻画服务流软件对比

对比类型	InVEST	SolVES	ARIES
原理	水量平衡原理,水土流失方程等 ^[46]	价值转移法 ^[47]	概率模型 ^[29]
服务类型	调节服务:洪水调节、土壤侵蚀等 文化服务:美感评估等 供给服务:木材供给,生物多样性等	文化服务:美学,娱乐休闲	文化服务:开放空间可达性,景观视域等 调节服务:洪水调节,沉积物调节等 供应服务:水供应等
尺度案例	公共空间:黄河保护区湿地等 城区-区域:北京山区等; 城市:北京市等	公共空间:武义县南部生态公园等 街区:羚羊谷山水观光游憩区等 城市:关中-天水经济区等	城区:河流洪泛区等 城市:华盛顿市等
算法	基于自然过程的复杂经验公式	Maxent (最大熵)	SPANs (代理主体)
模型优点	评估结果的可视化表达;操作过程具有可重复性,调节方便	可结合大数据辅助评估,实时性强;成果空间显性效果佳	城市尺度应用广泛,30 m 以上均有应用;涉及服务流类型多;集成代码,可根据实际情况修改部分条件
模型缺点	对数据变化非常敏感,无法核算经济价值	数据要求较高;涉及服务流类型单一	模型设计复杂,缺乏透明性;参数修改不便,对用户自身要求高

2.2.1 InVEST InVEST (生态系统服务和交易综合评估模型)是用于量化生态系统服务功能的评价模型,旨在通过模拟不同土地覆被情景下生态系统服务的物质质量和价值量的变化^[29, 48]。模型提供了多种生态系统服务功能评估,涉及调节服务(洪水调节、土壤侵蚀等)、文化服务(美感评估等)和供给服务(木材供给,生物多样性等)多种服务类型。

InVEST 模型具有多模块、多层次的特点。该模型基于流域尺度建立不同层级模型,主要分为 0~3 层 4 个层级模型^[49]:0 层为用于关键区的识别,1~3 层为相对价值,提供更精确的生态系统服务功能交易评估结果。模型从时间和空间尺度进

行差异化评估:0、1 层适用于多年平均数据,空间尺度在地区级以上,可拓展至全球尺度;2、3 层以日值或月值为时间序列,可细化至中小尺度^[50]。目前 0 层和 1 层的应用较为广泛,集中于对水调节和碳储量等。在较大尺度上的研究,如 LEH et al^[51]研究了西非两国在土地利用变化下生态系统服务功能的空间差异,KOVACS et al^[17]研究了美国明尼苏达州的生态系统评估等。这些评估与分析适用于较大尺度,对生态价值的评估分区精度不高。但由于 2、3 层的模型算法相对复杂,目前主要集中于中小尺度的研究,如 ZHANG et al^[52]对沿海区进行自然服务价值计算,预测到 2025 年的各类情景设置

下的土地利用及生态服务价值。该模型基于流域尺度进行研究,因此,在中等尺度特别是流域范围内的评估效果较为显著。近几年关于自然保护区生态环境质量、城市尺度下的生态系统服务时空分异特征的研究增多,大部分基于流域对水文过程进行分析,研究水源供给及调节问题。

InVEST 模型可用于服务流的供需分析,评估其供需平衡关系及价值量。模型部分操作具有可重复性,且部分参数可进行调整,较为灵活简便;但由于模型中的关于水土流失等过程的公式由复杂的经验公式得来,因此适用范围并不广泛,特别是针对特定地理条件的研究区域。

2.2.2 SolVES SolVES 模型是基于价值转移法,内嵌 Maxent 算法,用于 ARCGIS 的生态系统服务评估工具。由于生态系统服务的价值评估涉及到一些非经济、以人感知为主的评价,用单纯的货币价值难以将其量化。价值转移法通过公众感知的非市场化价值,将这部分价值通过函数转移法将其价值空间化地表达出来,而 SolVES 模型正是整合了 Meta 分析方法及需求函数所开发的价值转移制图模型。SolVES 模型有 3 大功能^[53]: 1) 社会价值图的生成; 2) 解释价值指数与环境之间的关系; 3) 调用 Maxent 对研究地输出的统计模型转移成决策地的社会价值,进行决策地的社会价值制图。总体来看,模型适用于城市范围下各类型尺度,主要针对文化服务等难以用货币衡量价值的服务。

SolVES 模型也适用于对服务的供需关系进行研究,最大特点是对文化系统服务有较高的适用性,能够对生态要素的社会价值进行评估。其次,模型在不同尺度上表现出差异化的结果,也对城市尺度下广泛应用模型进行文化服务流的研究提供理论支持。但 SolVES 模型依赖于问卷调查,对数据的要求较高,并且针对的服务类型也有限,因此模型的研究尺度也受到区域限制较大。

2.2.3 ARIES ARIES 是一个集成平台,旨在评估生态系统服务(ES)并向人类阐明其价值。ARIES 通过在兴趣领域中建立点对点连接,生态系统服务供给和使用的概率模型,将这些福利的实际物质流(the actual physical flows)绘图(mapping)到受益人身上^[54]。其优越性体现在其能解决当时量化生态系统服务时产生的一些问题^[55],如无法体现尺度效应,生态系统服务产生的生物物理量难以刻画^[56],以及从生态系统向人类受益者传播的模式通常缺

乏清晰度等。这些模型能够使用相应的 GIS 数据来生成生态系统服务供给和使用的地图。最后,使用空间流模型(spatial flow models)来识别生态系统服务流的优势^[57]。

ARIES 在城市尺度下有广泛应用,最常见的为市(县)域尺度使用,如研究美国华盛顿特区的城市扩张对服务流的影响^[29],京津冀地区的淡水生态系统服务流^[25]等;在社区-区域一级也有一定研究,如利用 ARIES 在 200 m 分辨率的空间网格对实际与潜在服务值进行建模和比较^[58],以及对 ARIES 在河流关键路径,高汇聚地点进行模拟的可行性评估^[59]。

ARIES 与其他模型不同的是其集中于对服务流的过程模拟,也就是基于对服务流的第一种理解。通过 ARIES 能够对实际物质流的路径和具体位置有更精确的认识,适用于研究生态过程控制和污染控制等问题。但 ARIES 设计复杂,由于是集成代码对部分参数的设置也调整不便,限制了其使用的范围,增加了入门操作难度,今后可以进一步进行平台可操作性的研发工作。

3 结论与展望

3.1 研究特征及时间趋势

生态系统服务流的研究从生态系统服务评估出发,正向着尺度细化和方法体系搭建 2 个方向不断发展。从内容上看,近年来生态系统服务流的研究有 3 个特点。

1) 确定土地类型及城市人口密度对生态系统服务流的影响,更多考虑城市不同尺度下的生态系统服务的供需差异性,针对不同尺度展开对特定服务类型的研究,如考虑县域尺度生态系统服务价值的时空变化^[60],分析多尺度城市碳代谢情景模拟^[61]等。

2) 借助生态系统服务流对城市中的生态系统服务价值进行动态评估,强调时空属性及演变模拟,如研究快速城镇化地区的服务价值时空变化^[62],分析不同城市服务价值的时空动态演变等。

3) 着眼于构建通用框架,如 SERNA-CHAVEZ et al^[18]提出通用框架分析服务供给区与受益区的空间联系,引入指标显示供需比; GOPAL^[63]基于生态系统服务构建环境流框架,分析其生态及经济价值; XIAO et al^[18]以城市群为研究对象,描述文化生态系统服务利益流动和转化的基本过程,构建理论框架; SCHRÖTER et al^[64]构建了区域间生态系统服务流概念框架等。

从时间上看,关于城市尺度下生态系统服务流的研究呈现3个趋势。

1)研究尺度在城市范围内仍不断细化及深化:从对特大城市群的研究^[21],到着眼于部分城市^[65]、地区^[33]的生态系统服务供需关系,再到县域^[60]、区域^[27]的多尺度服务流格局分析,最后到小尺度区域细化到设施层面的供需分析^[66]。

2)研究方法及软件的不断更新与应用:关于服务流的研究,从一开始集中于对ARIES的算法研究及应用为主,到开发及应用各类针对特定生态系统服务流的软件及模型,从空间显性和精准模拟预测方面都有明显提升。

3)关于生态系统服务流的空间显性研究增多:从对生态系统服务的供需分析,到定量研究流量,再到用模型方法图示化服务流的路径及格网,研究越来越注重服务流在空间上的表达及展示。

3.2 研究难点及研究展望

根据目前城市尺度下对研究成果及手段来看,今后的研究难点会体现在以下2个方面。一是对城市尺度下生态系统服务流的量化研究,目前在区域及县域层面,已经有较多的研究及模型应用^[67],但对于特大城市群生态系统的服务价值评估研究,由于牵扯的生态要素和流动性复杂,目前对这类框架研究及问题探索较多,还没有深入到对流的机制研究的阶段;涉及到街道,社区等小尺度下的供需关系在地图中难以获取精确数据,导致研究缺乏数据精度支持及合适的软件应用;二是各类服务流的路径分析及模型构建及耦合关系研究:城市生态系统还包含了人类的参与和需求,生态要素在人参与的作用下其传播和流动路径发生改变。生态要素涉及在不同的生态系统服务类型中扮演不同角色,对于由要素串联的服务类型在生态系统服务价值核算上的关系以及各类型生态系统服务在城市范围不同尺度下的耦合关系也是需要研究的重点。在小尺度范围内,具体的生态系统服务流的模拟仍然需要大量的数据及调研。

随着技术的进步及研究的不断深入,在考虑人类供需关系的城市尺度下的生态系统服务流的研究会逐步深入,目前在城市以下尺度的研究生态系统服务的软件开发还较为薄弱,对生态服务类型在城市范围的尺度分类及应用也较少,今后预计会结合大数据手段,对城市区域服务流路径进行实时的分析及模拟,更好地调节城市基础设施资源、生态

要素资源的分配;并利用已有的城市资源及需求关系进行更加合理的城市规划、设计的应用。

参考文献

- [1] 张彪,谢高地,肖玉. 基于人类需求的生态系统服务分类[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(6): 64–67.
- [2] 毛齐正,黄甘霖,邹建国. 城市生态系统服务研究综述[J]. 应用生态学报, 2015, 26(4): 1023–1033.
- [3] WESTMAN W E. How much are nature's services worth?[J]. *Science*, 1977, 197(4307): 960–964.
- [4] EHRLICH P, EHRLICH A. The causes and consequences of the disappearance of species[J]. *Quarterly Review of Biology*, 1981, 1: 82–85.
- [5] 俞孔坚,王思思,李迪华,等. 北京城市扩张的生态底线——基本生态系统服务及其安全格局[J]. 城市规划, 2010, 34(2): 19–24.
- [6] COSTANZA R. Ecosystem services: Multiple classification systems are needed[J]. *Biological Conservation*, 2008, 141: 350–352.
- [7] 李双成,张才玉,刘金龙,等. 生态系统服务权衡与协同研究进展及地理学研究议题[J]. 地理研究, 2013, 32(8): 1379–1390.
- [8] 刘耕源,杨青. 生态系统服务的三元价值理论及在大尺度生态补偿上的应用探讨[J]. 中国环境管理, 2019, 11(1): 29–37.
- [9] 刘洋,毕军,吕建树. 生态系统服务分类综述与流域尺度重分类研究[J]. 资源科学, 2019, 41(7): 1189–1200.
- [10] 彭保发,郑俞,刘宇. 耦合生态服务的区域生态安全格局研究框架[J]. 地理科学, 2018, 38(3): 361–367.
- [11] 周鹏,周婷,彭少麟. 生态系统服务价值测度模式与方法[J]. 生态学报, 2019(15): 5379–5388.
- [12] 彭建,徐飞雄. 不同格网尺度下的黄山市生境质量差异分析[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(6): 887–897.
- [13] BURKHARD B, KROLL F, NEDKOV S, et al. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets[J]. *Ecological Indicators*, 2012, 21: 17–29.
- [14] KOELLNER T, BONN A, ARNHOLD S, et al. Guidance for assessing interregional ecosystem service flows[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 105: 92–106.
- [15] SCHRÖTER M, KOELLNER T, ALKEMADE R, et al. Interregional flows of ecosystem services: Concepts, typology and four cases[J]. *Ecosystem Services*, 2018, 31: 231–241.
- [16] LAN X, TANG H P, LIANG H P. A theoretical framework for researching cultural ecosystem service flows in urban agglomerations[J]. *Ecosystem Services*, 2017, 28: 95–104.
- [17] KOVACS K, POLASKY S, NELSON E, et al. Evaluating the return in ecosystem services from investment in public land acquisitions[J]. *PLOS ONE*, 2013, 8: e62202.
- [18] SERNA-CHAVEZ H M, SCHULP C J E, VAN BODEGOM P M, et al. A quantitative framework for assessing spatial flows of ecosystem services[J]. *Ecological Indicators*, 2014, 39: 24–33.
- [19] VALLECILLO S, LA NOTTE A, ZULIAN G, et al. Ecosystem services accounts: Valuing the actual flow of nature-based recreation from ecosystems to people[J]. *Ecological Modelling*, 2019, 392: 196–211.
- [20] QIN K Y, LIU J Y, YAN L W, et al. Integrating ecosystem

- services flows into water security simulations in water scarce areas: Present and future[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 670: 1037 – 1048.
- [21] 方创琳, 周成虎, 顾朝林, 等. 特大城市群地区城镇化与生态环境交互耦合效应解析的理论框架及技术路径[J]. *地理学报*, 2016, 71(4): 531 – 550.
- [22] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(8): 1243 – 1254.
- [23] 刘金雅, 汪东川, 张利辉, 等. 基于多边界改进的京津冀城市群生态系统服务价值估算[J]. *生态学报*, 2018, 38(12): 4192 – 4204.
- [24] 汪东川, 孙志超, 孙然好, 等. 京津冀城市群生态系统服务价值的时空动态演变[J]. *生态环境学报*, 2019, 28(7): 1285 – 1296.
- [25] LI D L, WU S Y, LIU L B, et al. Evaluating regional water security through a freshwater ecosystem service flow model: A case study in Beijing-Tianjin-Hebei region, China[J]. *Ecological Indicators*, 2017, 81: 159 – 170.
- [26] 黄木易, 岳文泽, 方斌, 等. 1970-2015 年大别山区生态服务价值尺度响应特征及地理探测机制[J]. *地理学报*, 2019, 74(9): 200 – 216.
- [27] 胡其玉, 陈松林. 厦漳泉地区生态系统服务价值时空分布格局演变[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(5): 334 – 339.
- [28] 孙逊. 基于绿地生态网络构建的北京市绿地体系发展战略研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
- [29] ZANK B, BAGSTAD K J, VOIGT B, et al. Modeling the effects of urban expansion on natural capital stocks and ecosystem service flows: A case study in the Puget Sound, Washington, USA[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2016, 149: 31 – 42.
- [30] 孙思琦, 郭添, 薛达元. 重庆市巫山县土地利用格局及其生态系统服务价值的时空变化[J]. *生态科学*, 2019, 38(1): 176 – 185.
- [31] KROLL F, MULLER F, HAASE D, et al. Rural-urban gradient analysis of ecosystem services supply and demand dynamics[J]. *Land Use Policy*, 2012, 29(3): 521 – 535.
- [32] 汪静, 杨正, 尹晓霞. 刚察县土地整治项目与生态系统服务价值研究[J]. *青海国土经略*, 2018(4): 74 – 76.
- [33] 孙孝平, 李双, 余建平, 等. 基于土地利用变化情景的生态系统服务价值评估: 以钱江源国家公园体制试点区为例[J]. *生物多样性*, 2019, 27(1): 51 – 63.
- [34] 陶赞. 基于 VEP 与 SolVES 模型的游客景观生态服务偏好及环境满意度研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2016.
- [35] ALSAMADISI A G, TRAN L T, PAPEŞ M. Employing inferences across scales: Integrating spatial data with different resolutions to enhance Maxent models[J]. *Ecological Modelling*, 2020, 415: 1 – 11.
- [36] GOLDENBERG R, KALANTARI Z, CVETKOVIC V, et al. Distinction, quantification and mapping of potential and realized supply-demand of flow-dependent ecosystem services[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 593-594: 599 – 609.
- [37] 章莉, 詹庆明, 蓝玉良. 基于微气候模拟的武汉居住小区植被降温通风效应研究[J]. *中国园林*, 2019, 35(3): 98 – 102.
- [38] 詹庆明, 欧阳婉璐, 金志诚, 等. 基于 RS 和 GIS 的城市通风潜力研究与规划指引[J]. *规划师*, 2015(11): 103 – 107.
- [39] HE S, SU Y, SHAHTAHMASSEBI A R, et al. Assessing and mapping cultural ecosystem services supply, demand and flow of farmlands in the Hangzhou metropolitan area, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 692: 756 – 768.
- [40] 中国电信股份有限公司. 用于数据业务网络的信令分析和系统: CN201110079797.5[P]. 2012-10-09.
- [41] 朱凯. 手机信令数据在大西安规划领域应用初探[J]. *城市地理*, 2017(22): 31 – 32.
- [42] BALZAN M V, CARUANA J, ZAMMIT A. Assessing the capacity and flow of ecosystem services in multifunctional landscapes: Evidence of a rural-urban gradient in a Mediterranean small island state[J]. *Land Use Policy*, 2018, 75: 711 – 725.
- [43] 袁周炎妍, 万荣荣. 生态系统服务评估方法研究进展[J]. *生态科学*, 2019, 38(5): 210 – 219.
- [44] 卫亚星, 王莉雯. 应用遥感技术模拟净初级生产力的尺度效应研究进展[J]. *地理科学进展*, 2010(4): 471 – 477.
- [45] 杨会巾, 刘丽娟, 马金龙, 等. 基于 Landsat 8 遥感影像反演干旱区净初级生产力的尺度效应[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(5): 1294 – 1300.
- [46] YANG D, LIU W, TANG L Y, et al. Estimation of water provision service for monsoon catchments of South China: Applicability of the InVEST model[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2019, 182: 133 – 143.
- [47] SHERROUSE B C, CLEMENT J M, SEMMENS D J. A GIS application for assessing, mapping, and quantifying the social values of ecosystem services[J]. *Applied Geography*, 2011, 31(2): 748 – 760.
- [48] 于磊, 顾懿, 李建新, 等. 基于 SWAT 模型的中尺度流域气候变化水文响应研究[J]. *水土保持通报*, 2008, 28(4): 152 – 154.
- [49] 唐尧, 祝炜平, 张慧, 等. InVEST 模型原理及其应用研究进展[J]. *生态科学*, 2015, 34(3): 204 – 208.
- [50] 黄从红, 杨军, 张文娟. 生态系统服务功能评估模型研究进展[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(12): 246 – 253.
- [51] LEH M D K, MATLOCK M D, CUMMINGS E C, et al. Quantifying and mapping multiple ecosystem services change in West Africa[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, 165: 6 – 18.
- [52] ZHANG Y, RUCKELSHAUS M, ARKEMA K K, et al. Synthetic vulnerability assessment to inform climate-change adaptation along an urbanized coast of Shenzhen, China[J]. *Journal of Environment Management*, 2020, 255: 109915.
- [53] 霍思高, 黄璐, 严力蛟. 基于 SolVES 模型的生态系统文化服务价值评估——以浙江省武义县南部生态公园为例[J]. *生态学报*, 2018, 38(10): 3682 – 3691.
- [54] WILLCOCK S, MARTÍNEZ-LÓPEZ J, HOOFTMAN D A P, et al. Machine learning for ecosystem services[J]. *Ecosystem Services*, 2018, 33(Part B): 165 – 174.
- [55] BAGSTAD K J, JOHNSON G W, VOIGT B, et al. Spatial dynamics of ecosystem service flows: A comprehensive approach to quantifying actual services[J]. *Ecosystem Services*, 2013, 4: 117 – 125.
- [56] BERNABE J B, DAVID M, MORENO R T, et al. ARIES: Evaluation of a reliable and privacy-preserving European identity management framework[J]. *Future Generation Computer*

- Systems, 2020, 102: 409 – 425.
- [57] VILLA F, BAGSTAD K J, VOIGT B, et al. A methodology for adaptable and robust ecosystem services assessment[J]. PLOS ONE, 2014, 9: 1 – 18.
- [58] BAGSTAD K J, VILLA F, BATKER D, et al. From theoretical to actual ecosystem services: Mapping beneficiaries and spatial flows in ecosystem service assessments[J]. Ecology and Society, 2014, 19(2): 743 – 756.
- [59] VOGEL R M, SIEBER J, ARCHFIELD S A, et al. Relations among storage, yield, and instream flow[J]. Water Resources Research, 2007, 43(5): 1 – 41.
- [60] 张凯, 庞伟亮, 孙秋各, 等. 县域尺度生态系统服务价值对土地利用变化的响应[J]. 黑龙江农业科学, 2019(2): 117 – 122.
- [61] 夏楚瑜. 基于土地利用视角的多尺度城市碳代谢及“减排”情景模拟研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [62] 孙伟晔, 吴江国, 唐文刚. 快速城镇化地区的生态系统服务价值时空变化研究——以苏州市为例[J]. 国土与自然资源研究, 2018(6): 22 – 26.
- [63] GOPAL B. A conceptual framework for environmental flows assessment based on ecosystem services and their economic valuation[J]. Ecosystem Services, 2016, 21: 53 – 58.
- [64] SCHRÖTER M, BARTON D N, REMME R P, et al. Accounting for capacity and flow of ecosystem services: A conceptual model and a case study for Telemark, Norway[J]. Ecological Indicators, 2014, 36: 539 – 551.
- [65] 吴晓, 周忠学. 城市绿色基础设施生态系统服务供给与需求的空间关系研究——以西安市为例[J]. 生态学报, 2019, 39(24): 9211 – 9211.
- [66] 丁振民, 姚顺波. 小尺度区域生态补偿标准的理论模型设计及测度[J]. 资源科学, 2019, 41(12): 2182 – 2192.
- [67] 刘慧敏, 刘绿怡, 任嘉衍, 等. 生态系统服务流量化研究进展[J]. 应用生态学报, 2017(8): 2723 – 2730.

(上接第 47 页)

民人均生活能源消费碳排放逆转超越城镇居民, 要进一步分析这一现象背后的原因, 科学集约化布局农村能源供给基础设施, 引导农村居民绿色低碳消费。

从生产端看, 最重要的是提供性价比高的低碳绿色消费产品和服务, 要密切关注与 8 大居民消费领域密切相关的 25 个生产部门能源消费碳排放情况, 从根本上降低居民消费领域的碳排放强度。一方面, 通过节能减排和环境保护, 倒逼产业端淘汰落后和污染生产产能; 另一方面, 通过建立消费端绿色低碳消费方式, 引导产业端大力发展绿色低碳产能, 用政府引导和市场主导机制建立绿色低碳的产业体系, 从而提供绿色低碳消费产品和服务, 大大降低居民消费端能源消费碳排放量。

参考文献

- [1] 丁凡琳, 陆军. 居民能耗碳强度测算及其空间影响研究——来自中国 285 个地级市面板数据[J]. 当代经济科学, 2020, 42(2): 92 – 103.
- [2] 周嘉, 时小翠, 赵靖宇, 等. 中国居民直接生活能源消费碳排放区域差异及影响因素分析[J]. 安全与环境学报, 2019, 19(3): 954 – 963.
- [3] 徐丽, 曲建升, 李恒吉, 等. 中国居民能源消费碳排放现状分析及预测研究[J]. 生态经济, 2019, 35(1): 19 – 23.
- [4] 李国志. 城镇居民生活能源碳排放的省域差异及影响因素[J]. 北京交通大学学报(社会科学版), 2018, 17(3): 32 – 40.
- [5] 赵丽萍, 王瑶瑶. 中国居民直接生活能源消费碳排放时空特征分析[J]. 消费经济, 2018, 34(2): 45 – 51.
- [6] 米红, 张田田, 任正委, 等. 城镇化进程中家庭 CO₂ 排放的驱动因素分析[J]. 中国环境科学, 2016, 36(10): 3183 – 3192.
- [7] 姚亮, 刘晶茹, 袁野. 中国居民家庭消费碳足迹近 20 年增长情况及未来趋势研究[J]. 环境科学学报, 2017, 37(6): 2403 – 2408.
- [8] 曲建升, 刘莉娜, 曾静静, 等. 中国居民生活碳排放增长路径研究[J]. 资源科学, 2017, 39(12): 2389 – 2398.
- [9] 王泳璇. 城镇化与碳减排目标背景下能源-碳排放系统建模研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- [10] 郑继承. 城乡居民生活能源消费碳排放测算研究——以贵州省为例[J]. 生态经济, 2017, 33(6): 14 – 18.
- [11] 范玲, 汪东. 我国居民间接能源消费碳排放的测算及分解分析[J]. 生态经济, 2014, 30(7): 28 – 32.
- [12] 汪东, 汲奕君, 田丽丽, 等. 中国居民生活能源消费 CO₂ 排放的影响因素研究[J]. 环境污染与防治, 2012, 34(4): 101 – 105.