

景观规划导向的绿色基础设施研究进展 ——基于“格局—过程—服务—可持续性”研究范式

李凯¹, 侯鹰², Hans Skov-Petersen¹, Peter S. Andersen¹

(1. 哥本哈根大学地理科学与自然资源管理系, 哥本哈根 1165;

2. 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)

摘要: 中国目前处于新型城镇化与生态文明建设的重要时期, 引入绿色基础设施(Green Infrastructure, GI)规划框架对协调城市发展与生态保护具有重要意义。基于景观生态学中“格局—过程—服务—可持续性”研究范式, 对近年来中国内外GI规划进行针对性综述, 利用该范式对相关研究的理论来源与进展进行梳理。研究表明: GI格局研究中, 景观格局指数是应用最为广泛的方法。针对于景观连接度, 形态学空间格局分析等结构连接度评价方法具有计算简单、适用性广的优势, 但缺乏明确的生态学含义; 图论等功能连接度则针对特定的生态过程, 是GI格局与生态过程的重要联系, 将是下一步研究重点。GI生态过程研究借鉴生态网络的理论与方法, 其规划步骤可分为核心区选取、阻力面构建、潜在廊道识别三部分。GI生态系统服务研究中, 生物物理量模型与经济计量模型广泛应用于调节、供给与支持服务评价中, 而文化服务评价则将问卷调查作为基础数据获取的重要途径。另外, 生态系统服务需求研究涉及到生态系统服务的实际需求与使用偏好, 相关定量评价方法以及成果的实际应用有待进一步探索。GI景观可持续性研究中, 在明晰GI提供的生态系统服务总量的基础上, 服务间权衡与协同效应已成为GI规划中的重要考量, 而情景规划可以有效模拟GI生态系统服务的动态变化。最后, GI规划应将提升景观可持续性作为规划目标, 据此研究提出了重视格局与过程相互影响机制的基础研究、加深GI生态系统服务需求端研究、明晰生态系统服务间协同与权衡效应、将GI与实际规划结合四项研究展望。

关键词: 风景园林; 景观生态学; 格局—过程—服务—可持续性; 绿色基础设施

至2050年, 城市将聚集全球66%的人口, 城市将成为主要人居环境^[1]。然而, 在城镇化进程中, 建设用地无序扩张与下垫面持续硬化导致了一系列生态问题, 如热岛效应、景观破碎化与生物多样性流失等^[2-4], 严重威胁城市可持续性, 如何有效协调城市发展与生态保护成为亟需解决的关键问题。在此背景下, 绿色基础设施(Green Infrastructure, GI)作为“生命支持系统”, 首次于1990年在美国马里兰州绿道运动中被正式提出^[5]。GI的根本理念是一种区别于人工“灰色基础设施”、基于自然的解决方案(nature-based solution), 希冀通过合理规划与管理自然资源的方式为人类提供生态、社会与经济多种效益^[6]。2013年, 欧盟委员会明确将GI定义为“经过战略性规划后, 由自然、半自然区域连接而成的空间网络, 与人为管理和设计的环境要素共同提供多项生态系统服

收稿日期: 2019-06-27; 修订日期: 2020-02-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(41601556)

作者简介: 李凯(1992-), 男, 山东日照人, 博士研究生, 研究方向为风景园林规划与设计、生态系统服务。

E-mail: likai4699@foxmail.com

通讯作者: 侯鹰(1985-), 男, 四川内江人, 博士, 副研究员, 研究方向为生态系统服务与生态风险。

E-mail: yinghou@rcees.ac.cn

务”^[7]。经过30年的理论与实践探索,GI逐步发展为控制城市无序蔓延与保护土地资源的空间框架^[8],成为当前景观规划与自然资源管理领域的研究热点。目前中国处于空间规划体系转型的关键时期,GI被认为是实现中国新型城镇化的重要规划途径,近年来相关研究逐年增多^[9]。

需要指出的是,除风景园林外,GI同时吸引了包括环境科学、市政工程与社会科学等众多学科的关注^[10]。交叉学科研究极大地拓展了GI的研究范畴,并为GI规划的“多功能性”与“多目标性”提供了理论支持,却也对其概念界定与研究内容造成一定的混淆与模糊,即使在风景园林学科内部对GI都有如雨洪管理措施、生态网络、安全格局等不同解读,导致景观规划者无法针对性地开展研究与实践^[11]。同时,目前对近10年中国内外GI规划研究尚缺乏时效性、系统性梳理,尤其对其背后的景观生态学理论体系未能深入揭示,导致难以对相似研究进行归纳与对比,为研究者提供一个清晰的研究框架。因此,本文以景观规划为导向,以景观生态学中“格局—过程—服务—可持续性”研究范式作为限定框架,对融入景观生态学理论与方法的GI规划研究进行针对性的理论辨析与综述,并进一步提出潜在研究热点,为相关研究提供理论参考。

1 “格局—过程—服务—可持续性”与GI规划

“格局—过程—服务—可持续性”是景观生态学中的重要研究范式,具体可表述为在景观格局与生态过程互相作用机制的研究基础上,进一步对生态系统服务进行研究,以实现区域及城市景观可持续性^[12]。风景园林的本质是土地营造^[13],生态是景观规划最基本的特征,而景观生态学则为该部分研究提供了量化工具与理论借鉴^[14],近年来两门学科的紧密结合促使生态规划研究在方法与技术上快速发展^[15],GI规划就是其中的重要典型成果。本文首次基于“格局—过程—服务—可持续性”研究范式对GI规划进行综述,明确限定研究范围,即景观尺度下,风景园林学与景观生态学耦合的景观生态规划,确保该综述具有针对性;另一方面利用这一成熟的研究范式,揭示相关研究的理论与方法来源,使其进行体系化呈现,从而使各研究成果得以进行横向与纵向比较,并指出当前研究不足与潜在热点。根据欧盟委员会GI定义,GI规划体现出“通过各种景观规划的方式,促进物种在景观内部迁徙以及为人类提供各项惠益”的规划思路^[8]。结合“格局—过程—服务—可持续性”研究范式,可将GI规划进一步提炼为“通过规划来优化区域景观格局,以维持关键生态过程与提升生态系统服务,进而提升景观可持续性”。基于此,研究结合相关文献提出景观规划导向的GI研究热点框架(图1)。

2 GI空间格局研究

景观生态学中,格局是景观的空间结构特征,也是生态系统空间变异程度的直接表现^[16],具体到GI规划研究中,GI格局是其组成要素在空间上的排列与组合,包括各类型要素的形状、类型、数量、空间分布及关系^[5]。对GI格局进行定量刻画,可以为GI的格局、生态过程与生态服务相互作用机制提供研究基础^[17],另外可作为城市规划、土地整理等规划实践的生态绩效评价标准^[18],最后还可以通过多时空尺度的GI格局刻画,揭示其演变规律与驱动机制^[19],为GI规划与管理提供科学依据。

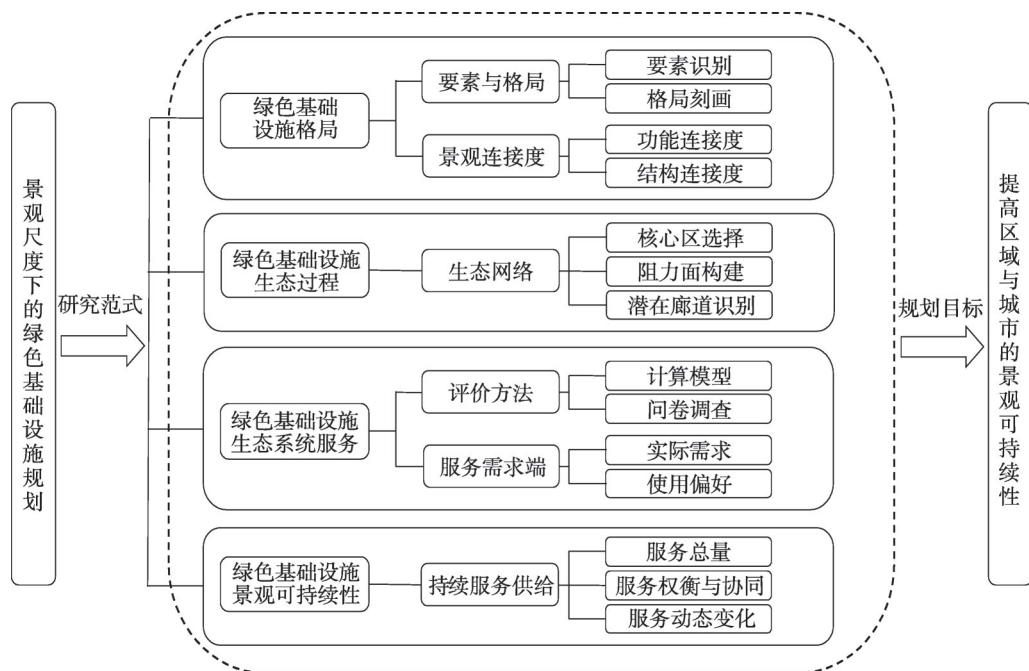


图1 景观规划导向的GI研究热点框架

Fig. 1 Research framework of green infrastructure oriented by landscape planning

2.1 GI要素与格局

GI要素为组成GI、发挥重要生态功能或在景观结构中占据关键位置的特定生态用地^[6]，GI格局刻画的第一步就是GI要素识别，技术手段一般基于ArcGIS平台，利用土地利用/覆盖数据提取特定类型作为要素。如为评价城市边缘区GI生态系统服务，Yang等^[20]基于土地调查数据，选取旱田、灌木林地、果园等共15类二级土地利用类型作为要素，对不同土地利用类型赋予特定生态系统服务当量。而在GI网络构建中，基于Landsat TM遥感数据的人工解译，Shi等^[21]选取了林地、耕地、水体三类土地利用/覆盖类型作为要素；考虑到GI网络针对陆生生物迁徙，杨志广等^[22]仅选取林地1类土地覆盖类型作为要素。可以确定的是，GI要素一般从绿色空间中进行选取，但并不是所有类型的绿色空间都属于GI要素，如Contesse等^[23]就耕地是否属于GI进行了专门探讨。总体而言，在GI要素提取上，一方面需要考虑研究数据的精细程度，另一方面也需要结合研究特定目的。另外，在评价GI生态系统服务时，部分研究采用服务供给单元（Services Providing Units）作为基本单元，根据生态系统服务价值来识别不同重要性等级的GI要素，从而进一步采取GI保护与恢复的景观管理措施^[6,8]。

景观格局指数是最为常用的格局刻画方法，相关指标可分为斑块、类别与景观三个层面^[24]。该方法通过定量方式能简洁、直观地揭示格局及其时空变化，目前被广泛应用于GI格局刻画^[25-27]，常用指标包括斑块数量、形状指数、分维数与邻近指数等^[28]。但景观格局指数存在指标繁杂、部分指标间存在相关关系、缺乏明确生态学含义等问题^[29]。使用时需要根据研究目的确定具体指标，必要时可采用数学方法降低指标间冗余，如线性回归分析、主成分法可作为筛选潜在指标的有效方法^[30]。而在刻画GI格局时空变化时，除景观格局指数外，还可借鉴土地利用变化中相关方法进行描述，如单一/综合动态

度(变化速度)、伸缩强度指数(变化强度)、转移矩阵(变化方向)以及变化热点/冷点识别(变化空间聚集效应)等^[31],从多方面对GI时空演变进行分析。另外,形态学空间格局分析(Morphological Spatial Pattern Analysis, MSPA)方法也被广泛应用于从国土到城市尺度GI演变研究中^[32-34]。总体而言,景观格局指数虽然存在各种弊端,但目前仍是格局刻画最有效的方法,国际上学者已尝试将景观格局指数运用到GI生态系统服务评价中^[24],这也反映将GI格局与服务深入耦合的研究趋势。

2.2 GI景观连接度

景观连接度是斑块间互相联系与作用的空间表现,对生态系统稳定性与韧性起到关键作用^[35],是GI规划的重要目标^[36]。景观连接度分为结构连接度与功能连接度^[37]。有研究表明,城市街区(census tract)尺度下,GI的结构连接度与功能连接度具有显著正相关性^[35],但该结论在针对不同尺度或特定生态过程的研究中,是否具有普适性仍有待探索。结构连接度借鉴拓扑学等空间量化方法,强调空间结构上的连续性,具有计算简便、适用性广的优势。如Vasiljević等^[36]采用结构连接度作为生物多样性与游憩服务的综合评价指标,证实了贝尔格莱GI规划的积极影响。近年来应用较多的MSPA法也属于结构连接度范畴。该方法仅需要土地覆盖类型,依据图形规则运算后,将绿色空间分为7种类型,分别为核、穿孔、边缘、桥、环、分支与孤岛^[32,38]。Wickham等^[32]选定核与桥类型作为GI组成部分,对美国国土尺度的GI演变进行研究,Chang等^[39]则进一步将7种要素归类为GI的核心区域(核、穿孔与边缘)、连接(桥、环、分支)、踏脚石(孤岛),但在如何赋予每类要素明确的生态学含义上尚未达成共识。事实上,这是结构连接度的共有缺陷,仅关注于平面结构,缺乏明确的生物相关性^[40]。而功能连接度从生物感知与活动出发,对应特定的生态过程。其中图论作为典型的功能连接度方法,对将生物扩散距离和行为规律进行综合考虑,被广泛应用于各个尺度的GI评价中^[37,41],另外最小费距作为结合结构与功能连接度的方法,为构建GI网络提供了关键技术手段^[21]。连接度是格局与过程的重要联系,针对于特定生态过程的功能连接度将是下一步研究重点。

3 GI生态过程研究

生态过程是景观中的能量、物质与信息流动或转化的总称,强调生态事件与现象发生的动态特征^[16]。生态过程既包括花粉传播、物种迁徙等生物过程,也包括水土侵蚀等非生物过程。但因为生态过程研究依赖大量的、长时间序列的实地观测数据,且易受尺度效应、气候差异等多种因素影响,其产生机理、驱动机制以及动态变化一直是生态学领域研究的难点^[42]。因此,如何利用GI规划对主要生态过程进行调控尚缺乏全面、可靠的理论依据。然而,随着景观生态学发展,“斑块—廊道—基底”模式的提出为生物迁徙这一过程提供了空间显式的认知途径^[16],使得岛屿生物地理学与保护生态学的研究成果可以被规划者应用于实践规划,由该模式发展而来的生态网络更是为GI规划提供了可以维护生物迁徙的理论依据^[37]。本文重点综述GI规划中生物迁徙过程。GI规划以生态网络为规划工具,利用生态廊道将核心景观斑块互相连接以形成空间网络,提升景观连接度,从而减缓物种在景观镶嵌体内的迁徙困难程度。GI网络构建按顺序包括三部分:核心区选取、阻力面构建、潜在廊道识别。

最初核心区大多选取重要斑块或生物核心栖息地,主要划定范围包括现有的自然保

护区、森林公园与大型林地等^[43]，并结合专家咨询、德菲尔法等相关手段，存在一定主观性与随机性。近年来，相关学者相继采用斑块面积、形状指数、连通度、生境质量、目标物种出现频率与植被覆盖度指数等^[6,21,37,39,44]某个或多个指标对核心区进行识别，并与MSPA方法^[21,22]进行结合。另外，基于多项生态系统服务（主要为调节与支持服务）价值与生物多样性存在正相关关系^[8]，生态系统服务也逐渐成为核心区选定的重要标准^[45]。而当GI网络范围限定于中心城区时，考虑到城市绿色资源稀缺性，一般直接选取规模较大（如面积超过0.2 km²）的城市公园作为核心区^[46]。

阻力面用于描述生物迁徙通过特定景观单元的困难程度，是识别潜在生态廊道的前提。阻力面一般采用专家对不同土地利用/覆盖类型进行赋值的方式，结合地形因素（高程、坡度、地形位指数等）、生态敏感性等因素进行确定^[39,47]。考虑到人类活动的影响，夜间灯光数据与不透水表面比例可以用于对阻力面的修正^[48]。Peng等^[45]则提出，将生态质量取倒数后再标准化处理后，可以得到更为精准的阻力面结果。另外，相关研究基于景观格局指数与生态服务价值对不同土地利用/覆盖类型进行阻力赋值的探索^[22]。由于阻力面的赋值区间（最大值与最小值）由专家进行确定，具有一定主观性。尹海伟等^[43]采用不同阻力赋值区间的方式对阻力面进行敏感性检验，结果表明，阻力面赋值区间直接影响廊道识别，在不同赋值情景下，存在廊道重合度低于30%的情况。可见，阻力面的构建需要探索更为客观的赋值方法，或通过设置不同赋值情景进行比较，以确保结果更为精确。

确定核心区与阻力面后，一般采用最小费距模型（least-cost model）即可进行潜在廊道识别。该模型兼顾实际距离（欧氏距离）与生物在不同景观类型中的渗透性，可以有效识别物种迁徙与扩散的最佳路径^[46]。为确定廊道保护与建设的优先级，在识别所有潜在廊道后，一般需要采用重力模型对廊道的重要程度进行评价。该模型提出廊道重要程度可以用被连接斑块间的相互作用强度来表达，且该强度取决于斑块的自身属性与累计阻力值^[46]。近年来，Wei等^[49]则提出利用空间句法可以从结构优化角度对廊道进行优先级评价，评价结果将网络建设与人类活动因素有效结合。而电路理论是另外一种有效评价廊道重要程度的方法，可以较好地模拟多物种的随机扩散行为，且能识别网络中的障碍点与关键战略点，可以对GI进行精细化管理与规划^[45,50]。确定廊道重要性后，Zhang等^[35]根据廊道重要程度设置不同规划情景，利用网络分析方法评价不同情景下廊道对网络连接度的提升程度，为廊道建设的成本—效益分析提供科学依据。由于土地资源珍稀性，廊道除了满足生物迁徙需求，往往还需结合城市居民福祉、建设可实施性等重要因素，因此廊道选址一般是多重规划目标的综合结果，相关学者在廊道适宜性评价、景观多样性与公众参与等多方面做出积极的研究探索^[51,52]。

4 GI生态系统服务研究

多功能性是GI规划的重点与核心，而生态系统服务理论为多功能性评价提供了理论与方法依据^[53]。生态系统服务是人类从生态系统中所获得的直接和间接收益^[54]。基于生态系统—人类福祉层级模型^[11]，生态过程是生态系统服务产生的前提，一种生态过程可以产生或影响多种生态系统服务，因此促进正向生态过程可以有效提升生态系统服务^[42]。具体到GI规划中，GI以构建空间网络的方式，促进生物迁徙这一正向生态过程进而维持

区域生物多样性。一方面,生物多样性本身被认为是一种最终的生态系统服务^[55];另一方面,生物多样性是众多生态系统服务的基础,对不同的生态系统服务具有积极作用,如相关研究已表明生物多样性对景观美学、地方感、游憩价值等生态系统服务社会价值的产生具有重要影响^[55]。因此,在GI规划中,其生态过程与生态系统服务存在重要的内在关联,两部分研究紧密联系。同时,生态系统服务是生态系统与社会系统间的连接,只有在存在实际需求的情况下,人类从生态系统获取到惠益(benefits),生态功能才能转化为生态系统服务。因此,生态系统服务的多少既取决于其供给潜力,也取决于实际享用惠益与使用偏好(生态系统服务需求端)^[11]。

4.1 GI生态系统服务评价方法

GI可以提供调节、文化、供给与支持不同种类的生态系统服务^[56],近年来针对各类型服务的评价方法日益增多。景观尺度下生态系统服务评估一般基于ArcGIS平台,以土地覆盖/利用类型、土壤属性与地形地貌等各类自然与社会因素作为参数,利用生物物理量模型或经济计量模型进行计算^[57]。生物物理量模型可以将评价结果在空间上直观地进行表达,可以清晰了解区域间差异;经济计量模型则可将生态系统服务采用货币价值形式进行表达,能为生态补偿、土地整治等政策制定提供直接依据。

在调节、供给与支持服务评价中,应用广泛的生物物理量模型包括InVEST模型与i-Tree模型^[56]。其中InVEST模型已被应用于生境质量、水源涵养与碳储量等多项生态系统服务评估^[58],但在如城市公园、社区等中微观尺度难以奏效。i-Tree模型则可较好地弥补这一缺陷,该模型基于较精细的植被数据(如树种、冠幅与冠高等),可以对场所尺度的生态系统服务进行有效评估^[59]。但这类模型大多由国际上研究机构提出,模型参数设定需经过人工修正才能在中国进行应用^[56],存在一定的主观性,符合中国本土现状的评价模型与数据库亟需建立。而在经济计量模型中,由谢高地等^[60]提出的生态系统服务价值评价法在国内最为常用,该方法通过对中国学者大规模问卷调查,获取生态系统服务当量因子表,将当量因子定义为1 hm²全国平均产量的农田每年自然粮食产量的经济价值(对应当年全国的粮食平均市场价值的1/7),可将单位面积的不同类型生态系统能提供的各生态系统服务用当量因子的方式进行折算。基于该方法,相关学者对区域、城市与县域等多尺度GI的生态系统服务价值进行核算^[57],体现出该方法的普适性。该方法具有计算成熟、应用性广的优点,但也存在中微观尺度失灵、无法反映生态系统服务需求的弊端^[57]。基于评价结果,GI规划将生态系统服务价值高的区域划定为保护区域或禁建区域,将该划定空间与促进正向生态过程的GI网络相叠加,从而形成过程与服务并重的生态安全格局^[61]。

文化生态系统服务的本质是由生态系统传递给人类的信息^[62],所以相较于其他服务类型,文化服务评价更为重视人类感受^[63]。问卷调查是在社科类研究领域被广泛应用的调查方法,已成为大多文化服务评价中基础数据获取的重要来源^[56]。在对问卷结果进行统计检验后,各学者采用不同分析方法对GI文化服务展开评价。其中条件价值法等经济学方法已被广泛应用于GI文化服务价值核算^[64],而相关学者尝试将重要性—绩效分析方法引入到文化服务评价中,研究结果表明相较于货币评价方法,该方法能较好地克服文化服务的非消耗性对评价结果的干扰^[63]。而PPGIS、SOLVES等空间评价模型可以进一步赋予评价结果以空间属性^[65,66],从而揭示文化服务价值的空间分布特征,最终形成可视化制图为景观规划提供更为详细的科学依据。另外,文化服务具有无形性与主观性的特

征,因此评价过程中需要考虑评价者对文化服务的感知程度以及社会经济属性对结果的影响^[63,66]。

4.2 生态系统服务需求端研究

基于生态系统服务供需平衡视角进行GI规划为当前研究热点^[9],而精准刻画生态系统服务需求端是其研究前提^[27]。生态足迹作为较为成熟的可持续性评价方法,用生态生产土地面积的形式量化人类对生态系统需求,但统一折算方法对结果精准度造成了一定的影响^[67]。Burkhard等^[68]通过专家问卷、统计数据等方式提出生态系统服务供应—需求评价矩阵,但其赋值来源于专家主观判断,具有一定的主观性。基于此,相关学者提出,利用夜间灯光数据、土地利用开发程度与人口密度等社会、经济代理指标刻画需求程度^[69,70]。但该类方法只能在需求与供给统一量纲后,利用矩阵形式进行不同区域间的比较,却无法揭示特定区域内部实际的供需平衡状态。生态系统服务需求端既涵盖被实际使用的生态系统产品,同时也涉及到人类使用偏好^[71]。以文化生态系统服务为例,相关研究已表明,使用群体间对各服务具有显著的使用偏好差异^[63]。基于此,Elbakidze等^[72]通过对结构问卷调查获取城市居民对生态系统服务的使用偏好,并基于此绘制当地GI核心区(hubs);Brown等^[65]则利用PPGIS,从居民感知偏好角度揭示不同类型城市公园提供的各种惠益。总体而言,如何揭示生态系统服务需求并将其融入到GI规划中有待于进一步探索。

5 GI景观可持续性研究

格局、过程与服务作为景观生态学中的核心议题,已积累了大量的基础研究成果,如何利用该类知识来提升区域可持续性成为亟需解决的科学问题。基于此,Wu^[73]于2013年提出景观可持续性的研究框架,景观可持续性被定义为“特定景观所具有的、能够长期而稳定地提供生态系统服务、从而维护和改善本区域人类福祉的能力”。景观可持续性基于格局与过程研究的基础上,重点分析生态系统服务权衡与协同效应,和辨析生态系统服务动态与景观可持续性的互动机制^[73]。相关学者逐渐意识到,GI规划在实现景观可持续性中能够发挥关键作用^[27]。根据景观可持续性的含义与范畴,GI规划不仅需要保证生态系统服务总量,同时还需要对生态系统服务权衡、协同与动态变化进行综合考量,从而提供各项惠益和提升人类福祉。

受限于数据获取性与技术手段,生态系统服务研究难以涵盖所有服务类型,相关研究一般重点关注对当地生态安全与居民惠益最为重要的服务类型^[27]。在得到不同生态系统服务评价结果后,研究者一般采用不同服务叠加的方式进行服务总量核算,并以热点形式进行空间制图^[56]。热点为多种生态系统服务供给能力较强的区域,可以为GI规划与管理优先级提供科学依据。如Peng等^[45]利用产水量、土壤保持与固碳三项服务的热点确定了GI的核心区域;而Liquete等^[6]在识别多种生态系统服务热点后,构建了欧洲大陆尺度的GI分级规划并提出对应管控措施。

但生态系统服务间存在复杂的互相影响机制,简单叠加会导致生态系统服务价值的重复计算。因此,生态系统服务评价必须要充分考量该影响机制,即权衡与协同效应^[56]。其中协同指不同服务同时增长的情形,而权衡则指不同服务此消彼长的情形^[56]。理解生态系统服务间的权衡与协同有利于实现生态系统的综合管理,也是实现景观可持续性的

重要前提。例如退耕还林这一措施可以同时提升空气净化、缓解热岛与碳储存等多项服务,为人类提供多重惠益;但退耕还林也会不可避免损失一定的粮食供给服务,且造成区域产水量下降^[56]。研究表明,通过优化景观格局的方式可以有效调控生态系统服务间的协同与权衡关系^[58]。例如,Lanzas等^[8]基于系统保护规划的理念构建了区域GI网络,旨在实现生态系统服务间权衡最小化与协同最大化的规划目标;而Meerow等^[27]聚焦于生态系统服务需求间权衡与协同关系,开发出GI空间规划模型,可以为城市绿化的优先级与规划主要目标提供理论依据。

而生态系统服务动态的刻画可以监测区域、城市生态安全,从而为GI针对性规划提供科学依据^[74]。Yang等^[20]研究表明,近二十年间,城市用地扩张侵蚀绿色空间,进而导致多项生态系统服务下降;而Nieto等^[74]以12个地中海城市为例,研究同样发现,绿色空间的减少造成了各城市(尤其是城市边缘区域)的各项生态系统服务急剧下降,严重威胁当地居民福祉。在明晰生态系统服务持续下降的基础上,Gavrilidis等^[75]利用GI规划对城市扩张进行严格管控,并系统性绿化城市空地,希冀为当地居民提供城市生态系统服务。而情景规划作为应对“复杂而不确定性”的规划手段,可以通过设置不同情景,有效模拟未来生态系统服务变化,从而为决策者提供规划选项^[76]。如Li等^[76]利用元胞自动机模型模拟城市发展的不同情景,结果表明,实施GI规划的情景下生态系统服务可以得到有效维护;而Zhang等^[77]则以京津冀城市群为例,以调节、供给与支持生态系统服务的维持作为不同情景中的规划目标进行模拟,并对不同规划情景的模拟结果进行比较分析,最终提出对区域内生态系统服务价值高的林地与耕地进行重点保护的规划策略。

6 未来研究发展展望

“格局—过程—服务—可持续性”研究范式为GI规划提供了清晰的研究框架,同时也为GI规划明确了景观可持续性这一研究导向。一方面,GI规划应充分吸收景观生态学中的格局、过程等基础研究成果,将其应用于景观格局的合理优化;另一方面,GI规划应以提升景观可持续性为规划目标,长期地、可持续性地为人类提供各项生态系统服务。尽管GI规划在理论与实践方面取得上述一系列的研究成果,但在如何利用GI规划提升景观可持续性上,尚需要从以下几个方面重点开展研究。

6.1 重视格局与过程相互影响机制的基础研究

在生态过程上,GI规划以生态网络为工具,可以有效促进生物迁徙这一生态过程,但如何利用GI调控其他生态过程尚缺乏全面、可靠的基础研究支撑。随着对格局与过程相互影响机制的研究不断加深,如何通过优化GI格局促进正向生态过程、抑制负向过程将成为研究重点。如空气污染物扩散^[78]、热岛效应转移^[79]、碳氮循环^[80]等与人类福祉密切相关的生态过程,近年来已引起众多学者的关注,对其内在机制与影响因素展开研究。基于该类研究成果,再通过借鉴景观生态学中“源汇理论”“渗透理论”等成熟的理论与方法,可以进一步揭示景观格局与生态过程间的影响机制。随着该类基础研究的不断积累,规划者据此可以更有针对性地优化GI要素配置与结构,从而调控生态过程与提升生态系统服务,最终优化城乡人居环境。

6.2 加深GI生态系统服务需求端研究

生态系统服务的产生不仅依赖于自然环境供给,同时取决于人类实际需求^[70]。对生

态系统服务需求的精准刻画既可以揭示GI规划的优先级,且能确保规划能最大程度地满足居民实际需求与偏好。大数据等技术手段的兴起为该类研究提供了实现工具,如相关学者已利用手机信令数据揭示不同群体对城市公园的实际利用与使用偏好^[81],如何利用兴趣点(POI)、图像识别等技术精准刻画生态系统服务需求也将是下一步研究重点。中国民众对于参与城市规划的需求日益迫切^[82],通过公众参与GI规划,可以有效提升社会凝聚(social cohesion)与促进环境正义^[83]。目前国际上公众参与GI管理的信息数字工具已多达17种^[84],将其引入到中国相关研究中可以有效促进公众参与和确保GI符合不同居民群体的实际需求。

6.3 明晰生态系统服务间协同与权衡效应

不同生态系统服务间存在协同与权衡关系,这表明在GI规划中应从更为综合的角度出发,避免在提升某项生态系统服务的同时,导致其他生态系统服务受损^[56]。协同与权衡效应受自然、社会因素共同影响,明晰其背后驱动机制与主导因素有利于制定更为明确、适合当地的GI规划策略^[11]。目前协同与权衡研究主要借助统计学方法进行判断,但即使针对同一研究区域,随研究尺度变化,服务间关系也有可能发生改变^[56],这也表明GI规划在需要根据尺度效应确定最佳规划尺度。而生态系统服务簇可以有效揭示特定景观的主导生态系统服务类型,在刻画服务间权衡与协同效应上具有较大的潜力^[56]。

6.4 将GI与实际规划结合

当前中国新型城镇化持续推进,GI作为协调城市增长与生态保护的空间框架,在指导实践规划有极大的应用潜力。相关学者已就如何利用GI规划控制城市蔓延^[75]、划定城市生态带^[85]等进行了探索。另外,Hu等^[86]基于GI网络视角,对不同废弃矿区沉陷地进行重要性恢复优先级评价,为当地矿区生态恢复项目提供理论依据。GI作为一种综合性的创新规划方法^[11],与中国当前的三线划定、矿区生态恢复与公园城市建设等实际规划诉求紧密相关,将两者结合在一起,一方面可以发挥GI规划理论优势,具有实践价值,另一方面也将丰富GI规划理论与方法。

参考文献(References):

- [1] NATIONS U N. World Urbanization Prospects. New York: Department of Economic and Social Affairs, United Nation, 2014.
- [2] SUN X, GAO L, REN H, et al. China's progress towards sustainable land development and ecological civilization. *Landscape Ecology*, 2018, 33(10): 1647-1653.
- [3] WANG Z. Evolving landscape-urbanization relationships in contemporary China. *Landscape and Urban Planning*, 2018, 171: 30-41.
- [4] LIU C, WU X, WANG L. Analysis on land ecological security change and affect factors using RS and GWR in the Danjiangkou Reservoir Area, China. *Applied Geography*, 2019, 105: 1-14.
- [5] 裴丹. 绿色基础设施构建方法研究述评. *城市规划*, 2012, 36(5): 84-90. [PEI D. Review of green infrastructure planning methods. *City Planning Review*, 2012, 36(5): 84-90.]
- [6] LIQUETE C, KLEESCHULTE S, DIGE G, et al. Mapping green infrastructure based on ecosystem services and ecological networks: A Pan-European case study. *Environmental Science & Policy*, 2015, 54: 268-280.
- [7] MUBAREKA S, ESTREGUIL C, BARANZELLI C, et al. A land-use-based modelling chain to assess the impacts of natural water retention measures on Europe's Green Infrastructure. *International Journal of Geographical Information Science*, 2013, 27(9): 1740-1763.
- [8] LANZAS M, HERMOSO V, DE-MIGUEL S, et al. Designing a network of green infrastructure to enhance the conservation value of protected areas and maintain ecosystem services. *Science of the Total Environment*, 2019, 651(Pt1): 541-550.

- [9] 王云才, 申佳可, 彭震伟, 等. 适应城市增长的绿色基础设施生态系统服务优化. 中国园林, 2018, 34(10): 45-49. [WANG Y C, SHEN J K, PENG Z W, et al. The optimization of green infrastructure ecosystem services adapted to urban growth. Chinese Landscape Architecture, 2018, 34(10): 45-49.]
- [10] DI MARINO M, TIITU M, LAPINTIE K, et al. Integrating green infrastructure and ecosystem services in land use planning. Results from two Finnish case studies. Land Use Policy, 2019, 82: 643-656.
- [11] HANSEN R, PAULEIT S. From multifunctionality to multiple ecosystem services? A conceptual framework for multifunctionality in green infrastructure planning for urban areas. Ambio, 2014, 43(4): 516-529.
- [12] 赵文武, 王亚萍. 1981—2015 年我国大陆地区景观生态学研究文献分析. 生态学报, 2016, 36(23): 7886-7896. [ZHAO W W, WANG Y P. Analysis of literature of landscape ecology research in mainland of China during the 1981-2015 period. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(23): 7886-7896.]
- [13] 杨锐. 风景园林学科建设中的 9 个关键问题. 中国园林, 2017, 33(1): 13-16. [YANG R. Nine core questions in construction of landscape architecture discipline. Chinese Landscape Architecture, 2017, 33(1): 13-16.]
- [14] 王云才. 风景园林生态规划方法的发展历程与趋势. 中国园林, 2013, 29(11): 46-51. [WANG Y C. Development history and trends of ecological planning method in landscape architecture. Chinese Landscape Architecture, 2013, 29(11): 46-51.]
- [15] 于冰沁, 田舒, 车生泉. 从麦克哈格到斯坦尼兹: 基于景观生态学的风景园林规划理论与方法的嬗变. 中国园林, 2013, 29(4): 67-72. [YU B Q, TIAN S, CHE S Q. From McHarg to Steinitz: Transmutation of theories and methods in the field of landscape architecture based on landscape ecology. Chinese Landscape Architecture, 2013, 29(4): 67-72.]
- [16] 邬建国. 景观生态学. 北京: 高等教育出版社, 2007: 11-12. [WU J G. Landscape Ecology. Beijing: High Education Press, 2007: 11-12.]
- [17] TISCHENDORF L. Can landscape indices predict ecological processes consistently?. Landscape Ecology, 2001, 16(3): 235-254.
- [18] 方仁建, 沈永明. 围垦对海滨地区景观演变及其质心移动的影响: 以盐城保护区部分区域为例. 自然资源学报, 2015, 30(5): 772-783. [FANG R J, SHEN Y M. Effects of coast beach reclamation on the change of landscape pattern and its spatial centroids: A case study in coastal wetland of part of Yancheng National Natural Reserve. Journal of Natural Resources, 2015, 30(5): 772-783.]
- [19] LIU W, HOLST J, YU Z. Thresholds of landscape change: A new tool to manage green infrastructure and social-economic development. Landscape Ecology, 2014, 29(4): 729-743.
- [20] YANG J, GUAN Y, XIA J C, et al. Spatiotemporal variation characteristics of green space ecosystem service value at urban fringes: A case study on Ganjingzi district in Dalian, China. Science of the Total Environment, 2018, 639: 1453-1461.
- [21] SHI X, QIN M. Research on the optimization of regional green infrastructure network. Sustainability, 2018, 10(12): 4649.
- [22] 杨志广, 蒋志云, 郭程轩, 等. 基于形态空间格局分析和最小累积阻力模型的广州市生态网络构建. 应用生态学报, 2018, 29(10): 3367-3376. [YANG Z G, JIANG Z Y, GUO C X, et al. Construction of ecological network using morphological spatial pattern analysis and minimal cumulative resistance models in Guangzhou city, China. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(10): 3367-3376.]
- [23] CONTESSE M, VAN VLIET B J M, LENHART J. Is urban agriculture urban green space? A comparison of policy arrangements for urban green space and urban agriculture in Santiago de Chile. Land Use Policy, 2018, 71: 566-577.
- [24] FRANK S, FÜRST C, KOSCHKE L, et al. A contribution towards a transfer of the ecosystem service concept to landscape planning using landscape metrics. Ecological Indicators, 2012, 21: 30-38.
- [25] 陈弘志, 刘雅静. 高密度亚洲城市的可持续发展规划香港绿色基础设施研究与实践. 风景园林, 2012, 3: 55-61. [CHEN H Z, LIU Y J. Sustainable urban planning approach in compact Asian cities: A study of green infrastructure practice in Hong Kong. Landscape Architecture, 2012, 3: 55-61.]
- [26] KUTTNER M, HAINZ-RENETZEDER C, HERMANN A, et al. Borders without barriers-structural functionality and green infrastructure in the Austrian-Hungarian transboundary region of Lake Neusiedl. Ecological Indicators, 2013, 31: 59-72.
- [27] MEEROW S, NEWELL J P. Spatial planning for multifunctional green infrastructure: Growing resilience in Detroit. Landscape and Urban Planning, 2017, 159: 62-75.
- [28] TIAN Y, JIM C Y, TAO Y, et al. Landscape ecological assessment of green space fragmentation in Hong Kong. Urban Forestry & Urban Greening, 2011, 10(2): 79-86.

- [29] SHAO G, WU J. On the accuracy of landscape pattern analysis using remote sensing data. *Landscape Ecology*, 2008, 23 (5): 505-511.
- [30] DADASHPOOR H, AZIZI P, MOGHADASI M. Land use change, urbanization, and change in landscape pattern in a metropolitan area. *Science of the Total Environment*, 2019, 655: 707-719.
- [31] 吴琳娜, 杨胜天, 刘晓燕, 等. 1976年以来北洛河流域土地利用变化对人类活动程度的响应. *地理学报*, 2014, 69(1): 54-63. [WU L N, YANG S T, LIU X Y, et al. Response analysis of land use change to the degree of human activities in Beiluo River Basin since 1976. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(1): 54-63.]
- [32] WICKHAM J D, RIITTERS K H, WADE T G, et al. A national assessment of green infrastructure and change for the conterminous United States using morphological image processing. *Landscape and Urban Planning*, 2010, 94(3-4): 186-195.
- [33] 于亚平, 尹海伟, 孔繁花, 等. 基于 MSPA 的南京市绿色基础设施网络格局时空变化分析. *生态学杂志*, 2016, 35(6): 1608-1616. [YU Y P, YIN H W, KONG F H, et al. Analysis of the temporal and spatial pattern of the green infrastructure network in Nanjing, based on MSPA. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(6): 1608-1616.]
- [34] BARBATI A, CORONA P, SALVATI L, et al. Natural forest expansion into suburban countryside: Gained ground for a green infrastructure?. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2013, 12(1): 36-43.
- [35] ZHANG Z, MEEROW S, NEWELL J P, et al. Enhancing landscape connectivity through multifunctional green infrastructure corridor modeling and design. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2019, 38: 305-317.
- [36] VASILJEVIĆ N, RADIĆ B, GAVRILOVIĆ S, et al. The concept of green infrastructure and urban landscape planning: A challenge for urban forestry planning in Belgrade, Serbia. *IForest-Biogeosciences and Forestry*, 2018, 11(4): 491-498.
- [37] 张远景, 俞滨洋. 城市生态网络空间评价及其格局优化. *生态学报*, 2016, 36(21): 6969-6984. [ZHANG Y J, YU B Y. Analysis of urban ecological network space and optimization of ecological network pattern. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(21): 6969-6984.]
- [38] SOILLE P, VOGT P. Morphological segmentation of binary patterns. *Pattern Recognition Letters*, 2009, 30(4): 456-459.
- [39] CHANG Q, LIU X, WU J, et al. MSPA-based urban green infrastructure planning and management approach for urban sustainability: Case study of Longgang in China. *Journal of Urban Planning and Development*, 2015, 141(3): 1-16.
- [40] 陈利顶, 傅伯杰. 景观连接度的生态学意义及其应用. *生态学杂志*, 1996, (4): 37-42, 73. [CHEN L D, FU B J. The ecological significance and application of landscape connectivity. *Chinese Journal of Ecology*, 1996, (4): 37-42, 73.]
- [41] FOLTÊTE J-C. How ecological networks could benefit from landscape graphs: A response to the paper by Spartaco Gippoliti and Corrado Battisti. *Land Use Policy*, 2019, 80: 391-394.
- [42] 苏常红, 傅伯杰. 景观格局与生态过程的关系及其对生态系统服务的影响. *自然杂志*, 2012, 34(5): 277-283. [SU C H, FU B J. Discussion on links among landscape pattern, ecological process and ecosystem services. *Chinese Journal of Nature*, 2012, 34(5): 277-283.]
- [43] 尹海伟, 孔繁花, 祈毅, 等. 湖南省城市群生态网络构建与优化. *生态学报*, 2011, 31(10): 2863-2874. [YIN H W, KONG F H, QI Y, et al. Developing and optimizing ecological network of urban agglomeration in Hunan province, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(10): 2863-2874.]
- [44] 郝月, 张娜, 杜亚娟, 等. 基于生境质量的唐县生态安全格局构建. *应用生态学报*, 2019, 30(3): 1015-1024. [HAO Y, ZHANG N, DU Y J, et al. Construction of ecological security pattern based on habitat quality in Tang county, Hebei, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(3): 1015-1024.]
- [45] PENG J, YANG Y, LIU Y, et al. Linking ecosystem services and circuit theory to identify ecological security patterns. *Science of the Total Environment*, 2018, 644: 781-790.
- [46] KONG F, YIN H, NAKAGOSHI N, et al. Urban green space network development for biodiversity conservation: Identification based on graph theory and gravity modeling. *Landscape and Urban Planning*, 2010, 95(1-2): 16-27.
- [47] 丛佃敏, 赵书河, 于涛, 等. 综合生态安全格局构建与城市扩张模拟的城市增长边界划定: 以天水市规划区(2015—2030年)为例. *自然资源学报*, 2018, 33(1): 14-26. [CONG D M, ZHAO S H, YU T, et al. Urban growth boundary delimitation method integrating comprehensive ecological security pattern and urban expansion simulation: A case study of planning areas in Tianshui city (2015-2030). *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(1): 14-26.]
- [48] KLAR N, HERRMANN M, HENNING-HAHN M, et al. Between ecological theory and planning practice: (Re-) Connecting forest patches for the wildcat in Lower Saxony, Germany. *Landscape and Urban Planning*, 2012, 105(4): 376-384.

- [49] WEI J, QIAN J, TAO Y, et al. Evaluating spatial priority of urban green infrastructure for urban sustainability in areas of rapid urbanization: A case study of Pukou in China. *Sustainability*, 2018, 10(2): 327.
- [50] 刘佳, 尹海伟, 孔繁花, 等. 基于电路理论的南京城市绿色基础设施格局优化. *生态学报*, 2018, 38(12): 4363-4372. [LIU J, YIN H W, KONG F H, et al. Structure optimization of circuit theory-based green infrastructure in Nanjing, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(12): 4363-4372.]
- [51] QIAN J, XIANG W-N, LIU Y, et al. Incorporating landscape diversity into greenway alignment planning. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2018, 35: 45-56.
- [52] 罗坤. 大都市区绿道选线规划与建设策略研究: 以上海市徐汇区绿道为例. *城市规划学刊*, 2018, (3): 77-85. [LUO K. Greenway planning and construction strategy in metropolitan areas: Take Xuhui greenway in Shanghai as an example. *Urban Planning Forum*, 2018, (3): 77-85.]
- [53] LOVELL S T, TAYLOR J R. Supplying urban ecosystem services through multifunctional green infrastructure in the United States. *Landscape Ecology*, 2013, 28(8): 1447-1463.
- [54] COSTANZA R, D'ARCE R, DE GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(6630): 253.
- [55] 李奇, 朱建华, 肖文发. 生物多样性与生态系统服务: 关系, 权衡与管理. *生态学报*, 2019, 39(8): 2655-2666. [LI Q, ZHU J H, XIAO W F. Relationships and trade-offs between, and management of biodiversity and ecosystem services. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(8): 2655-2666.]
- [56] 毛齐正, 黄甘霖, 邬建国. 城市生态系统服务研究综述. *应用生态学报*, 2015, 26(4): 1023-1033. [MAO Q Z, HUANG G L, WU J G. Urban ecosystem services: A review. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(4): 1023-1033.]
- [57] 韩依纹, 戴菲. 城市绿色空间的生态系统服务功能研究进展: 指标, 方法与评估框架. *中国园林*, 2018, 34(10): 55-60. [HAN Y W, DAI F. Review of study on ecosystem services function of urban green spaces: Indicators, methods and assessment framework. *Chinese Landscape Architecture*, 2018, 34(10): 55-60.]
- [58] NELSON E, MENDOZA G, REGETZ J, et al. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2009, 7(1): 4-11.
- [59] HILDE T, PATERSON R. Integrating ecosystem services analysis into scenario planning practice: Accounting for street tree benefits with i-tree valuation in Central Texas. *Journal of Environmental Management*, 2014, 146: 524-534.
- [60] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 等. 青藏高原生态资产的价值评估. *自然资源学报*, 2003, 18(2): 189-196. [XIE G D, LU C X, LENG Y F, et al. Ecological assets valuation of the tibetan plateau. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(2): 189-196.]
- [61] 彭建, 赵会娟, 刘焱序, 等. 区域生态安全格局构建研究进展与展望. *地理研究*, 2017, 36(3): 407-419. [PENG J, ZHAO H J, LIU Y X, et al. Research progress and prospect on regional ecological security pattern construction. *Geographical Research*, 2017, 36(3): 407-419.]
- [62] LA NOTTE A, D'AMATO D, MAKINEN H, et al. Ecosystem services classification: A systems ecology perspective of the cascade framework. *Ecological Indicators*, 2017, 74: 392-402.
- [63] 李凯, 沈雯, 黄宗胜. 城市绿色空间生态系统文化服务绩效评价: 以贵阳市黔灵山公园为例. *城市问题*, 2019, (3): 44-50. [LI K, SHEN W, HUANG Z S. Research on evaluation for cultural ecosystem services performance of urban green spaces. *Urban Problems*, 2019, (3): 44-50.]
- [64] 李想, 雷硕, 冯骥, 等. 北京市绿地生态系统文化服务功能价值评估. *干旱区资源与环境*, 2019, (6): 33-39. [LI X, LEI S, FENG J, et al. Assessing the value of cultural ecosystem services in urban green space of Beijing. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2019, (6): 33-39.]
- [65] BROWN G, RHODES J, DADE M. An evaluation of participatory mapping methods to assess urban park benefits. *Landscape and Urban Planning*, 2018, 178: 18-31.
- [66] 霍思高, 黄璐, 严力蛟. 基于 SoIVES 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. *生态学报*, 2018, 38(10): 3682-3691. [HUO S G, HUANG L, YAN L J. Valuation of cultural ecosystem services based on SoIVES: A case study of the South Ecological Park in Wuyi county, Zhejiang province. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(10): 3682-3691.]
- [67] FANG K, HEIJUNGS R, DE SNOO G R. Theoretical exploration for the combination of the ecological, energy, carbon, and water footprints: Overview of a footprint family. *Ecological Indicators*, 2014, 36: 508-518.

- [68] BURKHARD B, KROLL F, NEDKOV S, et al. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets. *Ecological Indicators*, 2012, 21: 17-29.
- [69] 彭建, 杨旸, 谢盼, 等. 基于生态系统服务供需的广东省绿地生态网络建设分区. *生态学报*, 2017, 37(13): 4562-4572. [PENG J, YANG Y, XIE P, et al. Zoning for the construction of green space ecological networks in Guangdong province based on the supply and demand of ecosystem services. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(13): 4562-4572.]
- [70] 石忆邵, 史东辉. 洞庭湖生态经济区生态服务供需平衡研究. *地理研究*, 2018, 37(9): 1714-1723. [SHI Y S, SHI D H. Study on the balance of ecological service supply and demand in Dongting Lake ecological economic zone. *Geographical Research*, 2018, 37(9): 1714-1723.]
- [71] 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. *Ecological Indicators*, 2014, 36: 539-551.
- [72] ELBAKIDZE M, ANGELSTAM P, YAMELYNETS T, et al. A bottom-up approach to map land covers as potential green infrastructure hubs for human well-being in rural settings: A case study from Sweden. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 168: 72-83.
- [73] WU J G. Landscape sustainability science: Ecosystem services and human well-being in changing landscapes. *Landscape Ecology*, 2013, 28: 999-1023.
- [74] GARCÍA-NIETO A P, GEIJZENDORFFER I R, BARÓ F, et al. Impacts of urbanization around Mediterranean cities: Changes in ecosystem service supply. *Ecological Indicators*, 2018, 91: 589-606.
- [75] GAVRILIDIS A A, NIȚĂ M R, ONOSE D A, et al. Methodological framework for urban sprawl control through sustainable planning of urban green infrastructure. *Ecological Indicators*, 2019, 96: 67-78.
- [76] LI Y, MA Q, SONG Y, et al. Bringing conservation priorities into urban growth simulation: An integrated model and applied case study of Hangzhou, China. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 140: 324-337.
- [77] ZHANG D, HUANG Q, HE C, et al. Planning urban landscape to maintain key ecosystem services in a rapidly urbanizing area: A scenario analysis in the Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration, China. *Ecological Indicators*, 2019, 96: 559-571.
- [78] 戴菲, 陈明, 朱晟伟, 等. 街区尺度不同绿化覆盖率对 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 的消减研究: 以武汉主城区为例. *中国园林*, 2018, 34(3): 105-110. [DAI F, CHEN M, ZHU S W, et al. Effects of different green coverage in block scale on PM_{10} and $PM_{2.5}$ removal: A case study of the main city of Wuhan. *Chinese Landscape Architecture*, 2018, 34(3): 105-110.]
- [79] 马瑞明. 基于“源—汇”景观格局分析的城市温度调节服务定量研究. 北京: 中国地质大学, 2016. [MA R M. Research on quantitative evaluation urban temperature regulation service based on "source-sink" landscape pattern analysis. Beijing: China University of Geosciences, 2016.]
- [80] 韩士杰, 袁志友, 方运霆, 等. 中国北方森林和草地生态系统碳氮耦合循环与碳源汇效应研究. *北京林业大学学报*, 2016, 38(12): 128-130. [HAN S J, YUAN Z Y, FANG Y T, et al. Coupling of carbon and nitrogen, source and sink of carbon in forest and grassland ecosystems of Northern China. *Journal of Beijing Forestry University*, 2016, 38(12): 128-130.]
- [81] XIAO Y, WANG D, FANG J. Exploring the disparities in park access through mobile phone data: Evidence from Shanghai, China. *Landscape and Urban Planning*, 2019, 181: 80-91.
- [82] 韦飏, 戴哲敏. 比较视域下中英两国的公众参与城市规划活动: 基于杭州和伦敦实践的分析及启示. *城市规划*, 2015, (5): 32-37. [WEI B, DAI Z M. Analysis and implications of public participation in urban planning in China and the UK. *City Planning Review*, 2015, (5): 32-37.]
- [83] HANSEN R, OLAFSSON A S, VAN DER JAGT A P N, et al. Planning multifunctional green infrastructure for compact cities: What is the state of practice?. *Ecological Indicators*, 2019, 96: 99-110.
- [84] STEEN MØLLER M, STAHL OLAFSSON A. The use of e-tools to engage citizens in urban green infrastructure governance: Where do we stand and where are we going?. *Sustainability*, 2018, 10(10): 3513.
- [85] 李咏华, 马淇蔚, 范雪怡. 基于绿色基础设施评价的城市生态带划定: 以杭州市为例. *地理研究*, 2017, 36(3): 583-591. [LI Y H, MA Q W, FAN X Y. Delimiting the urban ecological belts based on green infrastructure assessment: A case study of Hangzhou. *Geographical Research*, 2017, 36(3): 583-591.]
- [86] HU T, CHANG J, LIU X, et al. Integrated methods for determining restoration priorities of coal mining subsidence areas based on green infrastructure: A case study in the Xuzhou Urban Area, of China. *Ecological Indicators*, 2018, 94: 164-174.

Research progress of green infrastructure oriented by landscape planning: From the perspective of "pattern-process-services-sustainability" research paradigm

LI Kai¹, HOU Ying², HANS Skov-Petersen¹, PETER S. Andersen¹

(1. Geosciences and Natural Resources Management, University of Copenhagen, Copenhagen DK 1165, Denmark; 2. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, CAS, Beijing 100085, China)

Abstract: China is in the important period of New-type Urbanization and ecological civilization construction, and introducing green infrastructure planning framework is of great significance in urban development and ecological protection. Based on "pattern-process-services-sustainability" landscape ecology paradigm, this study reviewed Chinese and international research on green infrastructure (GI) in the landscape scale in recent years. Results show that, in terms of the research on GI pattern, landscape pattern metric method is still the most common one. For landscape connectivity, the structural connectivity method such as Morphological Spatial Pattern Analysis has advantages of calculating simplification and high applicability, but it lacks clear ecological meanings. However, the functional connectivity method including graph theory serves specific ecological process, which will be research core in the future. Research on GI process focuses on biological migration based on the theory and method of ecological network, and its planning process can be divided into 3 parts: selection of core areas, construction of resistance surface and identification of potential corridors. In terms of research on GI ecosystem services, biophysical model and economic value model are widely used in the evaluation of regulating, provisioning and supporting services, and cultural services evaluation takes human feeling derived from questionnaire surveys as the basic data. Additionally, research on demand for ecosystem services involves real consumption and preference of ecosystem services, and its quantitative evaluation and planning application should be further explored. In terms of research on GI landscape sustainability, based on identification of the total amount of ecosystem services provided by GI, trade-offs and synergies between ecosystem services have been taken into consideration in GI planning, and scenario planning can simulate dynamics of GI ecosystem services. Finally, landscape sustainability should be set as the ultimate objective of GI planning, and then 4 research prospects were put forward, including: paying attention to basic research on interaction of pattern and process, deepening research on demand of GI ecosystem services, identifying trade-offs and synergies between ecosystem services and connecting GI with practical planning.

Keywords: landscape architecture; landscape ecology; pattern-process-services-sustainability; green infrastructure planning