申佳可，王云才 . 景观生态网络规划：由空间结构优先转向生态系统服务提升的生态空间体系构建 [J]. 风景园林，2020，27（10）：37-42.

景观生态网络规划：由空间结构优先转向生态系统服务提升的生态空间体系构建

Landscape Ecological Network Planning: Ecological Spaces System Building from Spatial Structural Priority to Ecosystem Services Improvement

申佳可 王云才 *
SHEN Jiake, WANG Yuncai*

开放科学（资源服务）标识码（OSID）

中图分类号：TU986
文献标识码：A
文章编号：1673-1530(2020)10-0037-06
DOI：10.14085/j.fjyl.2020.10.0037.06
收稿日期：2020-03-25
修回日期：2020-08-06

申佳可 / 女 / 同济大学建筑与城市规划学院在读博士研究生 / 研究方向为景观生态规划、风景园林规划设计
SHEN Jiake is a Ph.D. candidate in the College of Architecture and Urban Planning (CAUP), Tongji University. Her research focuses on landscape ecological planning, landscape planning and design.

王云才 / 男 / 博士 / 同济大学建筑与城市规划学院景观学系副主任、教授、博士生导师 / 同济大学建筑与城市规划学院生态智慧与生态实践研究中心副主任 / 同济大学高密度人居环境生态与节能教育部重点实验室、国土生态规划设计与环境效应研究中心主任 / 本刊编委 / 研究方向为图式语言与景观生态规划设计教学、科研和工程实践
通信作者邮箱 (Corresponding author Email)：wyc1967@tongji.edu.cn
WANG Yuncai, Ph.D., is the deputy director, professor and doctoral supervisor in the Department of Landscape Architecture, College of Architecture and Urban Planning (CAUP), Tongji University, deputy director of the Center for Ecological Wisdom and Ecological Practice, director of Land Planning, Design and Environmental Effect Research Center, Key Laboratory of Ministry of Education of Ecology and Energy-Saving Study of Dense Habitat (Tongji University), and an editorial board member of this journal. His research focuses on pattern language, landscape ecological planning and teaching, research and practice.

摘要：城市扩张带来的生境破坏及生态系统服务水平下降导致城市生态风险加剧。景观生态网络规划成为解决这一矛盾并响应国家生态文明政策的主要途径。基于对现有景观生态网络规划方法及其不足的梳理，提出构建以生态系统服务绩效提升为目标，基于融合功能与结构空间优先级的景观生态网络整体优化的概念与方法框架。该框架回应了国土空间规划体系下对生态空间体系规划的新需求，并强调了 4 个核心策略：基于城市生态问题的关键生态系统服务诊断、整合生态资源供给与人类社会需求的生态源识别、遵循生态系统服务交付过程并结合城市发展规划的廊道提取与网络结构修正、兼顾网络功能与结构价值最大化的生态用地多情景开发，以探索适应城市扩张、提高生态系统服务绩效的生态网络规划路径。

关键词：风景园林；景观生态网络；生态系统服务；空间优先级；生态空间体系；景观绩效提升；方法框架
基金项目：国家自然科学基金面上项目（编号 51978479）；中央高校基本科研业务费专项资金（编号 22120200082）

Abstract: The expansion of cities has led to the destruction of habitats and the decline of ecosystem services, which result in the aggravation of urban ecological risks. Landscape ecological network planning is the main way to solve this contradiction and respond to the national ecological civilization policy. Based on the summary of existing traditional landscape ecological network planning methods and shortcomings, this research constructs a conceptual and methodological framework for the overall optimization of the ecological network based on the spatial priority integrating function and structure, which aims to improve ecosystem service performance. The framework responds to the need for ecological space system planning under the system of territory spatial planning, and highlights four core strategies: key ecosystem service diagnosis based on urban ecological risks, identification of ecological sources integrating ecological resources supply and human society demands, extraction of corridors and structural modification of network following the ecosystem service delivery process and combined with urban development and planning, and ecological land use structure scheme development stressing the maximal value of ecological network function and structure, aiming at exploring the ecological network planning path to adapt to the expansion of cities and improve the comprehensive efficiency of ecosystem services.

Keywords: landscape architecture; landscape ecological network; ecosystem services; spatial priority; ecological spatial system; landscape performance enhancement; method framework
Fund Items: General Program of the National Natural Science Fund of China (No. 51978479); the Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 22120200082)

1 研究背景

1.1 国土空间规划对景观生态网络规划提出了新要求

景观生态网络规划是对以林地、草地、湿地、水体、未利用地等国土生态空间为主要规划对象的土地利用类型及布局的规划 [1]3948。作为对山水林田湖草生命共同体理念的落实和国土空间规划体系当中重要的组成部分，生态空间体系的构建是以生态空间体系保护与管控为核心的国土空间协调规划。在国家构建生态文

表 1 现有基于空间优先级进行景观生态网络实践的理论基础及方法模型

Tab. 1 Theoretical basis and method model of existing landscape ecological network practices based on spatial priority

理论基础	方法模型		相关文献	网络构建模式及识别依据
	生态源识别	生态廊道识别		
景观生态学“斑块－廊道－基质”理论	景观异质性评价、景观格局分析、景观形态学分析	最小成本路径分析、景观阻力评价、生物流情景模拟分析	[6-7]	模式：以空间结构优化为原则 空间优先级识别依据：景观格局指数、景观中心度、网络结构指数等
网络分析方法	景观格局分析、景观中心度评价	基于图论的网络连接模式构建、网络分析法（Analytic Network Process，简称 ANP）模型、网络连接度指数分析	[8-11]	
基于焦点物种保护的空间适宜性评价	栖息地适宜性分析评价、生态敏感性分析、景观连通性指数分析	最小成本路径分析、空间句法分析、基于图论理论分析	[12-14]	模式：以识别功能优先斑块为核心 空间优先级识别依据：生态适宜性、景观－生态绩效等
景观－生态绩效	生态敏感性分析、建立基于景观－生态绩效（景观格局、生态及社会服务功能等）的评价指标体系	最小成本路径分析、生态累积耗费距离模型	[15-16]	
基于生态系统服务价值的生态重要性评价	生态系统服务评价与制图（方法：价值评估、指标测度、能值分析、等效因子法、供需匹配评价等）	最小成本路径分析、最小累积耗费距离模型、最小累积电阻模型、电路理论	[5, 17-18]	

明、实施“绿色发展”的大背景和城市持续扩张的压力下，国土空间规划需要景观生态网络规划在完成对生态空间体系有效保护的同时，担负起协调与城乡建设空间和农业生产空间的统筹，为“三区三线”划定提供依据。

1.2 生态系统服务提升是景观生态网络规划与优化的新目标

景观生态空间是构成多层次、网络化、功能复合的生态网络的空间载体，是具有生态服务功能、对生态系统和生物生境保护具有重要作用的空间[2]。生态系统服务是在区域及城市尺度上落实生态空间体系规划的基础，其测度、评价和管理是认识生态系统与人类福祉联系的重要环节与管理决策手段[3]。在此背景下，通过修复与加强受损的景观生态网络，提升生态系统服务整体绩效、解决城市内生态系统服务供需空间错配等问题，被视为从根本上缓解城市生态问题的重要途径，也是在相应尺度上进行生态廊道规划、自然保护地体系规划、城乡绿地系统规划、生态保护红线规划等国土空间规划体系下生态专项规划的核心目标。

2 景观生态网络规划的核心思想：空间优先级体系及其关联

2.1 景观生态网络规划核心：空间优先级及空间关联的识别与测度

在土地稀缺与资金有限的条件下，在现有空间与资源基础上，基于特定目的识别有效且高效的生态空间作为修复与强化受损生态网络的优先空间，对生物多样性保护、生态安全格局构建、景观生态网络规划等空间决策十分重要[4]。目前研究中进行景观生态网络规划的核心，是基于空间优先级的思想选取作为生态节点、生态源及生态廊道等网络基本构成要素的生态空间[5]783。学者们从不同的理论基础出发并通过多样化的方法与模型，在区域和城市等不同尺度上展开生态网络构建与优化的实践研究（表 1）。虽然在实践中，生态网络规划的结果往往表现为结构与功能同时的优化，例如：以结构优化为侧重的生态网络规划实践，其结果仍可以在一定程度上实现部分功能的被动优化。但总体来说，现有景观生态网络规划方法存在 2 种侧重点不同的技术路径和从不同维度出发的规划概念：1）以结构优化为空间优先级原则；2）以识别功能优先空间为核心。

2.2 以结构优化为空间优先级原则的景观生态网络规划方法的不足

基于景观生态学“斑块－廊道－基质”理论[1]3950, [6-7]以及网络分析[8-11]的规划方法更多关注于景观生态网络的空间分布与格局，较少考虑生态空间本身价值及其对周边环境的生态服务功能与价值，未对生态空间本身的功能或对城市的生态服务功能进行评价，使得规划的网络缺乏针对性以及与农耕空间、建设空间的内部联系，因此无法依据其真实的生态服务功能调整与其相邻的城市建设用地的土地利用方式，使生态空间与建设空间形成良性互动[19]。

2.3 以识别功能优先空间为核心的景观生态网络规划方法的不足

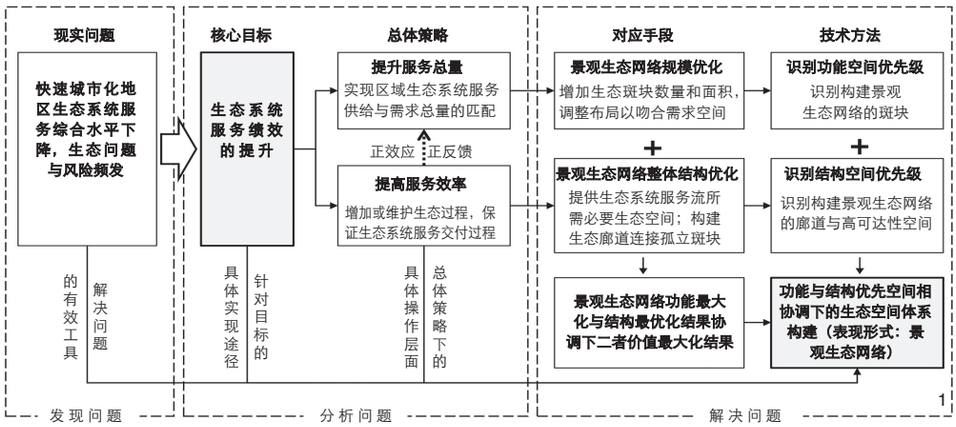
2.3.1 以焦点物种保护目标和景观－生态绩效为优先原则

以焦点物种保护为目标基于空间适宜性评价的规划方法形成的景观生态网络所具备的功能单一[12]1183, [13-14]，生态决定论下的网络构建忽略了自然资源提供的生态系统服务功能与城镇间的联系，未能从人类对于生态资源的需求方面进行评价，因此限制了资源保护管理与城镇发展的良性互动[17]103。基于景观－生态绩效的规划方法单从空间功能的角度建立评价指标体系[15], [16]50，缺乏基于空间明确信息的评价指标，使景观生态网络的功能优先空间不能落实到具体的生态用地空间上，无法指导区域或城市生态用地布局的优化。

2.3.2 以生态系统服务价值为优先原则

目前以生态系统服务价值为优先原则的规划方法，大部分关注的是斑块作为生态系统服务提供者的生态维度，忽视了生态系统与人类社会经济系统之间的相互作用[18]702。虽然 Zhang 等[18]703 在对生态系统服务供给评价的基础上加入了对人类生态需求的考虑及重要性评价，但研究成果停留在识别区域整体

的生态安全格局，尚未进一步落实到城市尺度这一更加精细的建设层面。同时，基于虚拟网格单元的生态系统服务评价与制图，也使评价结果难以直接对应并落实到具有实际边界的空间当中[20]7，削弱了实践操作水平上对景观生态网络构建与生态用地布局优化的指导性。此外，由于生态系统的复杂性，选取的生态系统服务类型和评价指标与生态系统服务评估中存在的不确定性息息相关。为减少这种不确定性，应基于对研究区域生态特征与生态问题的诊断，选取关键的生态系统服务进行评价并作为识别重要生态斑块的依据。这也是目前基于生态系统服务进行生态网络规划的研究中比较欠缺的。更重要的是，此类方法以评价生态系统服务总量为原则识别生态斑块，再通过构建阻力面进行结构优化，其本质仍是以识别功能优先空间为核心，并未形成基于生态系统服务优先与提升的整体方法论。单纯以生态系统服务总量增加为原则选择功能优先空间容易忽略景观生态系统的结构性，如忽略生态系统服务交付过程的路径、割裂景观空间的历史脉络、割裂城市中人与自然之间的空间联系；仅以结构优化为原则的廊道构建，一方面未必符合生态系统服务功能流与生态流的动向，另一方面也不一定满足生态系统服务供需在空间上的匹配关系。



1 以生态系统服务提升为目标与策略的景观生态网络规划的逻辑框架
Logical framework of landscape ecological network planning with the goal and strategy of improving ecosystem services

3 以生态系统服务提升为目标的景观生态网络规划方法

3.1 基于生态系统服务优先与提升进行景观生态网络规划的优势

1）从网络功能规划的维度来说，生态系统服务的评价综合了供需双方的因子，包括评价自然资源的生物物理指标以及评价人类需求的社会经济指标[21]，从而建立生态空间与人类建设空间的互动关系与响应机制，以定量化的评价结果为生态空间格局的规划提供科学依据。2）从网络结构规划的维度来说，通过对生态系统服务供给、需求与服务流（服务从供给区到受益区的空间联系）的评价与制图，清楚呈现景观结构内部的功能流与生态流从服务供给区向需求区的动态交付过程，有助于确认景观空间构型在城市潜在的功能结构层面及内部运作过程中是否发挥了作用[22]；通过提供不同类型服务流机制下生态系统服务交付过程所需的连接空间[23]31，加强网络结构与周围环境的深层次功能联系。3）从功能与结构整合规划的维度来讲，生态系统服务制图对城市用地决策和呈现空间信息至关重要，能显示在区域或城市内部生态系统服务供给与需求不匹配的具体位置[24]156，准确找出网络中生态系统服务水平较低的薄弱环节，有利于城镇发展趋势及内部土地利用方式的确定。总之，基于生态系统服务优先与提升进行生态网络规划，不仅是对结构空间的布局加以优化或选择出功能优先的空间；只追求生态网络功能或结构的最优化，无法兼顾生态系统服务总量与效率共同提升的目标。应该注重生态系统服务总量与效率间的价值博弈与权衡，即考虑生态网络规模优化与结构优化之间的协同效应，形成功能与结构共同价值最大化的生态网络优化结果。

3.2 以生态系统服务提升为目标的景观生态网络规划概念框架与方法逻辑

景观生态网络是建立于“结构性网络”和“功能性网络”相互叠合的一种复合型系统[16]4，其功能性表现为网络所提供的生态系统服务的总量，其结构性则与生态系统服务传递与交付的效率息息相关。因此，实现提升生态系统服务这一最终目标的思路与策略在于以下两方面。1）提升生态系统服务的总量。通过弥补缺失的生态功能或增强现有生态服务，实现区域生态系统服务供给与需求总量的匹配；对应的手段是通过增加构成网络的生态斑块的数量和面积，或调整其布局以吻合服务高需求空间，从而实现网络规模的优化。2）提高生态系统服务效率。通过保证不同生态系统服务流机制所需的必要连接空间、强化网络的连通性和可达性等结构属性，增加或维护生态过程以保证生态系统服务的交付过程，提高服务总体效率，最终反馈并表现为功能的增强；对应的手段是构建生态廊道，作为孤立斑块之间或服务供给区域和需求区域之间的空间连接，实现网络整体结构的优化。基于上述思路，构建以生态系统服务提升为目标与策略的景观生态网络规划的逻辑框架（图 1），厘清“提升生态系统服务总量与效率”这一核心目标与总体策略与网络优化中“功能优先”与“结构优先”这 2 个具体操作层面之间的逻辑关联。

3.3 基于生态系统服务提升的景观生态网络整体优化的方法框架

以生态系统服务为理论基础，以识别并测度融合功能与结构的空间优先级为技术核心，将生态空间体系的生态系统服务综合效能提升作为最终目标，对景观生态网络进行整体优化的方法框架主要包括以下 4 个部分（图 2）。

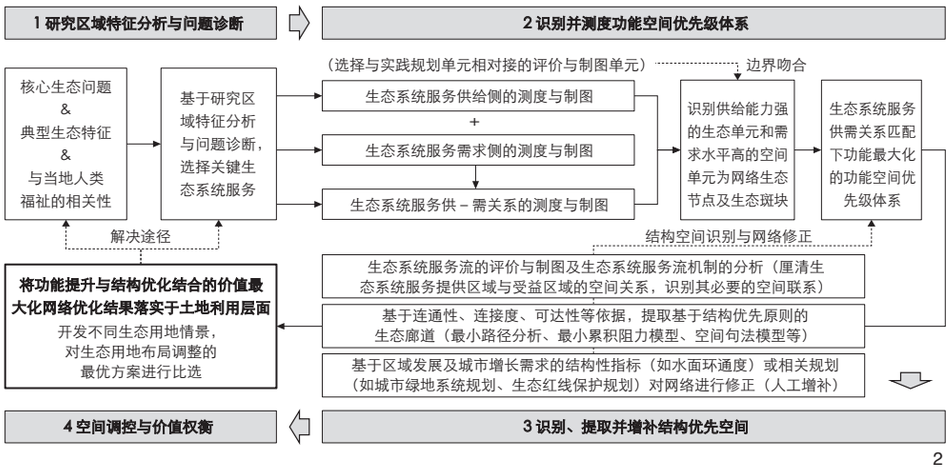
1）研究区域特征分析与问题诊断。通过查阅与该区域相关的已有文献、进行专家访谈、对利益相关者的问卷调查等方法，以研究区域面临的核心生态问题、具有的典型生态特征、与当地居民福祉密切相关3个方面为依据[25]47，对能解决研究区域问题所需的关键生态系统服务进行诊断，并选择相应的评价指标。例如，Wei等[25]48以中国新疆典型的绿洲——荒漠地区为研究区域，基于对该地区由地势特征导致的严重水土流失，以及因紧邻沙漠而具有的严重风沙侵蚀等核心生态问题的诊断，相应选取了土壤保持和固沙2个以解决问题为导向的关键生态系统服务及其评价指标；同时，基于对该干旱地区表现出对水的高度需求、对气候变化的敏感和对森林生态系统的重视等典型特征的分析，相应选取了水文调节、气候调节和栖息地维持3个以回应需求为导向的关键生态系统服务及其评价指标。

2）识别并测度功能空间优先级体系。首先，选择现实中存在实际边界的空间单元作为评价与制图的基本单元，使评价结果在实践规划单元中的落实更易实现。市域尺度上常见的生态系统服务评价与制图单元有土地利用单元[26]、城市绿地单元[27]、邻里街区单元[28]等。

其次，为每种生态系统服务供给选择能够描述服务不同方面的生物物理指标或代理（proxy）。对于服务的实际供应，选择相应的生物物理指标进行直接计算，此类指标诸如：水体可调蓄水量[29]、森林固碳量[30]545、水体氮净化量[31]；对于服务的相对能力，通过基于代理的方法选择一系列综合代理指标估计其自然潜力，如将栖息地质量指数作为测度生物多样性维持服务的代理，并将其量化为栖息地与公路、农田、城镇等威胁源的距离，栖息地类型对不同威胁源的敏感性，每种威胁源的相对影响及栖息地受法律保护的程度等综合代理指标的函数进行计算；此类代理还包括：水源涵养重要性综合指数[32]、土壤效率系数[33]、森林游憩指数[34]等。

除了提供生态系统服务的能力外，生态斑块满足人类对生态系统服务需求的能力也是其作为生态源的必需[18]702。从生态系统服务需求侧出发选择指标，对研究区域对于关键生态系统服务的需求进行评价与制图。需求指标的获取往往处于以下2个角度。①人类社会对生态系统服务的实际需求，如通过消费量和市场价格获悉人们对商品服务的需求量[35]544，或是基于人类偏好或意愿以及对风险防范需要的期望来推测对非商品服务的需求水平[36-37]。②城市中的环境质量要求和政策目标，如空气质量指标[24]149，通过以明确、可量化的环境质量标准代替难以量化的服务需求，尤其是对调节服务的需求。根据量化测度结果，通过直接制图、经验制图、模型或代理等方法[20]3将供给和需求评价的数值表达为空间上的分布，得到研究区域的生态系统服务供给与需求地图。

最后，基于生态系统服务的供需关系匹配评价，识别由供给能力强、需求水平高的生态斑块作为构建景观生态网络重要的生态源。例如，Chen等[35]546对上海的研究中，通过构建“生态供需比”模型将生态系统服务的实际供给与人类需求联系起来，以揭示空间上过剩或短缺的本质；陈骏宇等[30]546通过建立“供需指数”来刻画生态系统服务供需的状态：盈余、平衡或赤字。基于生态系统服务供需测度结果构建二者间的数量关系，将有助于供需关系匹配的量化评价和空间制图。



2 融合功能与结构空间优先级的景观生态网络整体优化方法框架

Framework of integrated optimization method for landscape ecological network based on spatial priority of function and structure

3）识别、提取并增补结构优先空间。首先，基于对生态系统服务不同类型流机制的分析和对生态系统服务流的制图，厘清生态系统服务提供区域与受益区域的空间关系[23]32，识别必要的空间联系，即生态系统服务交付过程中潜在的流区域。例如，Vrebos等[23]31基于对生态系统服务流机制的分类（原位流、重力单方向流、全方位流等），对基于服务流机制影响的生态系统服务供给进行了量化评价与空间制图。Field等[38]基于多重生态系统服务间的相互作用和服务流特征评估了多种服务对景观空间的联合影响，并利用空间网络理论方法识别了生态系统服务节点之间的连接性空间。其次，在此基础上通过构建阻力面提取连接各个独立生态源的潜在生态廊道。然而，只有可达性较强的生态空间才能在用地受限的快速城市化地区充分发挥功能。空间句法模型可以将研究区域的功能优先空间与生态廊道叠加所构成的潜在网络转化为直观的关系图，从空间可达性的角度对整个网络格局中各个生态空间及连接廊道进行结构优先级的评价与分级，筛选级别高的空间提取为景观生态网络空间格局的优化结果。最后，结合区域发展和城市增长实际需求，参考重要的结构性指标及相关规划对缺失的结构性廊道或节点（如重要的绿道、林带、自然或水源保护区等）进行人工增补。

例如，魏家星等[12]1184利用空间句法分析，基于结构优化视角对南京市浦口区绿色基础设施网络进行优先级的识别，并结合城市的生态红线、绿地系统规划对绿色基础设施网络规划结果进行优化调控，从而使绿色基础设施网络的构建更加科学。

4）空间调控与价值权衡。通过多情景分析的方法可以对生态用地布局的调整优化方案进行比选，找到协同效应下兼顾景观生态网络功能与结构价值最大化的土地利用布局最优方案，从而将对景观生态网络的优化落实到城市中具体的生态用地及土地利用规划这一层面。例如，Kain 等[39]以瑞典斯德哥尔摩市为例，通过对城市生态系统服务供给的评价，以对服务供给的促进和优化作为关注焦点与评判依据，比较了 2 个基于不同计划与设想的城市土地利用可选方案的优劣，其结果用以指导未来土地利用规划的发展。

3.4 景观生态网络规划需适应国土空间体系规划的新要求

中国新时期国土空间规划体系的建立为生态空间体系的规划提出了新要求，以生态系统服务总体绩效提升为目标的景观生态网络优化框架从以下 4 个方面对此做出了回应：

1）生态空间体系规划需面向新时代国土空间规划的战略要求，以生态文明为根本导向，以推进高质量发展、引导高品质生活、实现高水平治理为生态文明建设的核心目标[40]1。这就决定了在实施以景观生态网络构建为重要规划手段的生态空间体系规划的基础工作阶段，首先进行重大问题的研究是十分重要且必要的：诊断核心生态风险及其带来的生态问题与人民高品质生活和社会高质量发展间的矛盾，厘清生态文明建设的实际需求[41]27，并以此作为识别关键生态系统服务的重要依据。

2）在国土空间规划的基础工作阶段，国土资源环境承载力和国土空间开发适宜性评价是针对生态空间体系展开的重要前置性基础工作之一，其首要需求就是梳理、识别核心的生态源[42]。而基于生态系统服务的生态空间优先级识别与评价，为此提供了生态空间服务供给现状的可视化信息：生态空间的优先级别越高，表明它提供的服务功能的重要性越大，维持或提升服务的难度越小，这一生态空间就越应该被优先识别为重要的生态源而纳入景观生态网络中。此外，秉承国土空间规划“人与自然是生命共同体”这一理念[43]，在网络优化过程中不再以增加生态空间数量与面积为主要目标，而是通过整合、匹配自然资源供给与人类社会对生态系统服务的实际需求，在现有生态资源的基础上识别供需优先级，从而对生态空间实现分级、分类、分区管控。

3）在国土空间规划的方案编制阶段，对山水林田湖草等构成的生态空间体系格局的优化是国土空间总体格局优化的重要组成部分；其中，通过提取遵循生态系统服务交付过程的连接空间以优化蓝绿网络体系，以及识别连通性、可达性高的生态廊道以强化城乡格局与山水林田湖草等生态空间的衔接，为生态空间体系格局的优化提供重要的内容支撑与规划策略。与此同时，以保持总量不变和结构贯通为前提的网络结构性修正，也便于与国土空间规划体系下与生态空间体系相关的其他专项规划进行衔接，以形成国土空间开发保护一张图[40]6，如城市风廊规划、绿道建设规划、慢行交通系统规划等。

4）在生态空间体系规划的方案编制阶段，得到对生态用地调控的重要支撑有助于规划的落实，并使之有效指导约束其他涉及生态空间的专项规划内容的编制[44]20。通过开发并比较不同的生态用地规划情景，选择在生态系统服务绩效、环境空间公平性、服务供需空间匹配度等方面较高的最佳生态用地管理方案，为生态空间体系规划方案编制过程提供定量化辅助决策的信息[41]26以及与其他相关规划的同步调整，这是不可或缺的前期工作，也是全过程中的技术支持[44]21。

基于生态系统服务提升的生态网络优化框架对国土生态空间体系规划需求的回应，可总结为该优化方法的 4 个核心策略：基于城市生态问题的关键生态系统服务诊断，整合生态资源供给与人类社会需求的生态源地识别，遵循生态系统服务交付过程并结合城市发展规划的廊道提取与网络结构修正，以及兼顾生态网络功能与结构价值最大化的生态用地方案比选。

4 结论与讨论

中国城市在迅速发展的过程中正面临前所未有的干扰和冲击。在这种现实需求下，探索构建并优化景观生态网络的新途径，提升区域及城市生态系统服务整体绩效，促进区域生态环境可持续发展，无疑具有重大的学术和社会价值。然而，作为方法论的主体，基于国土空间结构优先的传统景观生态网络规划方法表现出诸如网络构建过于结构化和形态化、网络要素选择依赖于自然决定等弊端；现有基于国土空间功能优先的景观生态网络规划方法发展相对较弱，且存在网络功能缺乏基于空间位置的分析、网络构建成果缺少与土地利用层面规划实践的对接等不足。因此笔者提出：应注重生态系统服务总量与效率间的价值博弈与权衡，即考虑网络规模优化与结构优化之间的协同效应，形成功能与结构共同价值最大化的景观生态网络优化结果，并构建了融合功能与结构空间优先级的景观生态网络整体优化方法框架。该框架强调以下 4 个核心策略：基于城市生态问题的关键生态系统服务诊断、整合生态资源供给与人类社会需求的生态源地识别、遵循生态系统服务交付过程并结合城市发展规划的廊道提取与网络结构修正、兼顾网络功能与结构价值最大化的生态用地多情景开发。虽然目前已有很多实践应用基于各个策略展开，但尚未有研究能够综合并统筹各策略，从而形成融合功能与结构空间优先级的景观生态网络整体优化的技术路径。因此，笔者提出的景观生态网络优化方法框架可成为以生态系统服务提升为目标进行景观生态网络规划实践的指导与参考。

参考文献 (References)：

[1] 刘世梁，侯笑云，尹艺洁，等 . 景观生态网络研究进展 [J]. 生态学报，2017，37（12）：3947-3956.

[2] NEUENSCHWANDER N, HAYEK U W, GRÊT-REGAMEY A. Integrating an Urban Green Space Typology into Procedural 3D Visualization for Collaborative Planning[J]. Computers Environment and Urban Systems, 2014, 48(6): 99-110.

[3] 刘宇舒，赵天宇 . 景观生态视角下镇域生态服务评价与网络构建 [J]. 中国园林，2015，31（10）：71-75.
[4] VERHAGEN W, KUKKALA A S, MOILANEN A, et al. Use of Demand for and Spatial Flow of Ecosystem Services to Identify Priority Areas[J]. Conservation Biology, 2017, 31(4): 860-871.
[5] PENG J, YANG Y, LIU Y, et al. Linking Ecosystem Services and Circuit Theory to Identify Ecological Security Patterns[J]. Science of the Total Environment, 2018, 644: 781-790.
[6] 张远景，俞滨洋 . 城市生态网络空间评价及其格局优化 [J]. 生态学报，2016，36（21）：6969-6984.
[7] 尹海伟，孔繁花，祈毅，等 . 湖南省城市群生态网络构建与优化 [J]. 生态学报，2011，31（10）：2863-2874.
[8] 过萍艳 . 基于网络分析法的城镇绿地生态网络规划：以慈溪市宗汉街道为例 [D]. 杭州：浙江农林大学，2013.
[9] 王铭子 . 基于连接度的城市绿地生态网络研究 [D]. 北京：北京林业大学，2010.
[10] 吕放 . 基于网络分析法的吉林越北镇绿地生态网络构建研究 [D]. 沈阳：沈阳建筑大学，2015.
[11] 莫振淳，傅丽华，彭耀辉，等 . 基于综合重要度评价的生态空间网络关键节点识别 [J]. 湖南工业大学学报，2018，32（2）：64-69.
[12] 魏家星，宋轶，王云才，等 . 基于空间优先级的快速城市化地区绿色基础设施网络构建：以南京市浦口区为例 [J]. 生态学报，2019，39（4）：1178-1188.
[13] 吕东，王云才，彭震伟 . 基于适宜性评价的快速城市化地区生态网络格局规划：以吉林长白朝鲜族自治县为例 [J]. 风景园林，2013，20（2）：54-59.
[14] 胡望舒，王思思，李迪华 . 基于焦点物种的北京市生物保护安全格局规划 [J]. 生态学报，2010，30（16）：4266-4276.
[15] 陆明，曲艺 . 基于生态系统服务功能的区域生态网络构建：以哈尔滨为例 [J]. 中国园林，2017，33（10）：103-107.
[16] 安超，沈清基 . 基于空间利用生态绩效的绿色基础设施网络构建方法 [J]. 风景园林，2013，20（2）：22-31.
[17] 王旭东 . 基于空间效能的城镇绿地生态网络规划研究 [D]. 杭州：浙江农林大学，2016.
[18] ZHANG L, PENG J, LIU Y, et al. Coupling Ecosystem Services Supply and Human Ecological Demand to Identify Landscape Ecological Security Pattern: A Case Study in Beijing-Tianjin-Hebei Region, China[J]. Urban Ecosystems, 2017, 20(3): 701-714.
[19] 曲艺，陆明 . 生态网络规划研究进展与发展趋势 [J]. 城市发展研究，2016，23（8）：29-36.
[20] CHEN C, WANG Y, JIA J, et al. Ecosystem Services Mapping in Practice: A Pasteur's Quadrant Perspective[J]. Ecosystem Services, 2019, 40: 101042.
[21] PULIGHE G, FAVA F, LUPIA F. Insights and Opportunities from Mapping Ecosystem Services of Urban Green Spaces and Potentials in Planning[J]. Ecosystem Services, 2016, 22(Part A): 1-10.
[22] 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研究 [J]. 中国园林，2018，34（10）：45-49.
[23] VREBOS D, STAES J, VANDENBROUCKE T, et al. Mapping Ecosystem Service Flows with Land Cover Scoring Maps for Data-Scarce Regions[J]. Ecosystem Services, 2015, 13: 28-40.
[24] BARÓ F, HAASE D, GÓMEZ-BAGGETHUN E, et al. Mismatches Between Ecosystem Services Supply and Demand in Urban Areas: A Quantitative Assessment in Five European Cities[J]. Ecological Indicators, 2015, 55: 146-158.
[25] WEI H, LIU H, XU Z, et al. Linking Ecosystem Services Supply, Social Demand and Human Well-Being in a Typical Mountain-Oasis-Desert Area, Xinjiang, China[J]. Ecosystem Services, 2018, 31: 44-57.
[26] NIKODINOSKA N, PALETTO A, PASTORELLA F, et al. Assessing, Valuing and Mapping Ecosystem Services at City Level: The Case of Uppsala (Sweden)[J]. Ecological Modelling, 2018, 368: 411-424.
[27] YANG L, ZHANG L, LI Y, et al. Water-Related Ecosystem Services Provided by Urban Green Space: A Case Study in Yixing City (China)[J]. Landscape and Urban Planning, 2015, 136: 40-51.
[28] RAMYAR R. Social-Ecological Mapping of Urban Landscapes: Challenges and Perspectives on Ecosystem Services in Mashhad, Iran[J]. Habitat International, 2019, 92: 102043.
[29] 饶恩明，肖燚，欧阳志云 . 中国湖库洪水调蓄功能评价 [J]. 自然资源学报，2014，29（8）：1356-1365.
[30] 陈骏宇，王慧敏，刘钢，等 .“水—能—粮”视角下杭嘉湖区域生态系统服务供需测度及政策研究 [J]. 长江流域资源与环境，2019，28（3）：542-553.
[31] 王斌，张彪，王建锋，等 . 太湖流域水生态系统服务及其空间差异 [J]. 水土保持通报，2011，31（2）：215-221.
[32] 陈燕，燕彩霞，罗婵，等 . 长江三角洲生态系统服务重要性空间分布特征评价 [J]. 江苏农业学报，2019，35（1）：103-108.
[33] XU X, YANG G, TAN Y, et al. Ecological Risk Assessment of Ecosystem Services in the Taihu Lake Basin of China from 1985 to 2020[J]. Science of the Total Environment, 2016, 554-555: 7-16.
[34] QIU J, TURNER M G. Spatial Interactions among Ecosystem Services in an Urbanizing Agricultural Watershed[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2013, 110(29): 12149-12154.
[35] CHEN J, JIANG B, BAI Y, et al. Quantifying Ecosystem Services Supply and Demand Shortfalls and Mismatches for Management Optimisation[J]. Science of The Total Environment, 2019, 650: 1426-1439.
[36] NEDKOV S, BURKHARD B. Flood Regulating Ecosystem Services: Mapping Supply and Demand, in the Etropole Municipality, Bulgaria[J]. Ecological Indicators, 2012, 21(5): 67-79.
[37] CASTRO A J, VERBURG P H, MARTÍN-LÓPEZ B, et al. Ecosystem Service Trade-Offs From Supply to Social Demand: A Landscape-Scale Spatial Analysis[J]. Landscape and Urban Planning, 2014, 132: 102-110.
[38] FIELD R D, PARROTT L. Multi-Ecosystem Services Networks: A New Perspective for Assessing Landscape Connectivity and Resilience[J]. Ecological Complexity, 2017, 32: 31-41.
[39] KAIN J-H, LARONDELLE N, HAASE D, et al. Exploring Local Consequences of Two Land-Use Alternatives for the Supply of Urban Ecosystem Services in Stockholm Year 2050[J]. Ecological Indicators, 2016, 70: 615-629.
[40] 陈琳，杜凤姣 . 生态文明视角下上海市国土空间规划的实践与探索 [J]. 上海城市规划，2019（4）：1-8.
[41] 张云路，马嘉，李雄 . 面向新时代国土空间规划的城乡绿地系统规划与管控路径探索 [J]. 风景园林，2020，27（1）：25-29.
[42] 张雪飞，王传胜，李萌 . 国土空间规划中生态空间和生态保护红线的划定 [J]. 地理研究，2019，38（10）：2430-2446.
[43] 杨保军，陈鹏，董珂，等 . 生态文明背景下的国土空间规划体系构建 [J]. 城市规划学刊，2019（4）：16-23.
[44] 周海波，郭行方 . 国土空间规划体系下的绿地系统规划创新趋势 [J]. 中国园林，2020，36（2）：17-22.

图表来源 (Sources of Figures and Table)：

图 1、2 由作者绘制；表 1 由作者根据文献 [5-18] 整理绘制。

（编辑 / 刘玉霞）