



DOI: 10.5846/stxb202108182287

姜芊孜, 李金煜, 梁雪原, 肖华斌. 基于文献计量的绿色基础设施水生态系统服务供需评价研究进展. 生态学报, 2023, 43(4): 1738-1747.

基于文献计量的绿色基础设施水生态系统服务供需评价研究进展

姜芊孜, 李金煜, 梁雪原, 肖华斌*

山东建筑大学建筑城规学院, 济南 250101

摘要:作为国家的自然生命支持系统,区域、城市和社区尺度的绿色基础设施可提供多种水生态系统服务。然而,服务在传递过程中存在空间错位与时间滞后效应。绿色基础设施水生态系统服务供需评价能够识别供需时空异质特征,促进服务供给与需求的均衡。研究利用 Citespace 对国内外相关研究展开分析,阐明了绿色基础设施水生态系统服务的供需内涵,对供需评价内容、评价方法与均衡分析方法进行了综述。研究发现:(1)融合生态系统服务供需评价与绿色基础设施规划设计的研究有了初步进展,但针对绿色基础设施水生态系统服务的系统性研究并不多见。(2)供给评价研究丰富,测度指标多依赖客观的生物物理数据;需求评价热度上升,测度指标多基于消费、偏好、感知和社会经济价值;测度单元有行政单元、流域/生境等环境单元与土地利用单元等。(3)评价方法有生态模型法、公众参与法、价值评价法与经验统计模型法,生态模型法逐渐普及,提出了评价方法的选用与关键参数确定的原则。(4)供需均衡研究多聚焦数量、空间的静态均衡研究,动态均衡研究有待进一步探索。基于当前研究动态,未来应重点关注多尺度下供需评价指标体系构建,探索供需评价的集成方法,提高供需评价精度,加强供需动态均衡分析研究以及空间优化管理中的应用。

关键词:水生态系统服务;供需匹配;绿色基础设施;研究进展

生态系统服务(ES)是指生态系统与生态过程所形成及维持的人类赖以生存的自然环境条件与效用,包括对人类生存及生活质量有贡献的有形产品和无形服务^[1],是衔接城市居民生活福祉和生境斑块自然生态过程的核心概念^[2]。在所有 ES 类型中,与水相关的 ES(WES)对人类的生存和福祉最为重要^[3]。WES 是指河流、湖泊、湿地等水生态系统及其生态水文过程为人类提供的直接或间接惠益^[4]。绿色基础设施(GI)是国家的自然生命支持系统;区域尺度,GI 被视作相互连接的绿色空间网络,包括“水道、湿地、森林、野生动物栖息地和其他自然区域,绿道、公园和其他保护区域,农场、牧场和森林,荒野和开敞空间等”^[5];城市与社区尺度,GI 包括城市公园、社区花园、屋顶花园、小型水体和溪流、雨水花园、渗透沟渠、可渗水铺装、屋顶绿化等^[4]。作为区域与城市景观空间的重要组成^[6],GI 不仅提供了休闲娱乐、维持身心健康、生态旅游与审美体验等多种文化服务^[7],也提供了雨水调蓄、水质改善、地下水回补及生境维持等重要 WES^[8]。相比生态基础设施,GI 更加关注人在开放空间中的需求及所获得的惠益。然而,绿色基础设施水生态系统服务(GIWES)供需间存在明显的时空异质特征,导致 WES 从产生到受益的传递过程具有空间错位效应与时间滞后效应,WES 的潜在供给向实际供给转化低效,人类实际享用的 WES 有限^[9-11]。如空间上,人口密度高的城市建成区水文化服务低供高需,而人口稀疏、生态空间充足的区域则面临高供低需的问题;时间上,淡水补给与洪水调蓄

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(51908332);教育部人文社会科学研究青年基金项目(18YJCZH066);山东省自然科学基金博士基金项目(ZR2017BEE075);山东省高等学校青创科技支持计划项目(2020KJG004)

收稿日期:2021-08-18; **网络出版日期:**2022-07-19

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xiaohuabin@foxmail.com

服务从供给区到受益区,具有时间滞后效应。

目前,GIWES 供需识别、测度及空间化研究散见于 ES 相关文献中,针对 GIWES 的系统性研究较少。理论研究方面,江波等^[12]阐述了 ES 供需内涵、供需耦合途径,及供需耦合研究对流域水生态系统管理的启示。颜文涛等^[4]对 GI 洪水调节服务的供需内涵、主体构成及尺度关系进行了梳理,总结了供需测度方法,并构建了理论分析框架。实证研究方面,刘颂等^[13]在城市尺度上利用 WES 供需关系矩阵法,分析了嘉兴市水文调节服务的供需时空分异特征。Peng 等^[14]对珠海市 7 项 WES 供需进行量化评价与均衡分析,将林地、水田与鱼塘等供给能力强、供需匹配状态较好的区域作为城市生态用地优先保护区域。本文系统梳理了 GIWES 的供需概念内涵、评价内容、方法以及均衡分析方法,并针对目前研究存在的不足,提出了未来研究展望。研究有助于识别 GIWES 供需时空特征,促进 GIWES 供给向人类福祉需求转化和供需均衡,为 WES 导向下的 GI 规划、设计与管理提供科学依据。

1 相关研究进展

首先,以“绿色基础设施”、“水生态系统服务”与“供需评价”等相关概念为主题进行专业检索,获取中国知网(CNKI)与 Web of Science(WoS)数据库中 GIWES 供需评价的相关文献。CNKI 中检索文献共计 398 篇,时间跨度 2003—2022 年,WoS 中检索文献共计 93 篇,时间跨度 2010—2022 年。其次,利用 Citespace.5.8.R1 对检索文献进行分析得到中英文关键词共现与聚类分析图谱(图 1—2)。

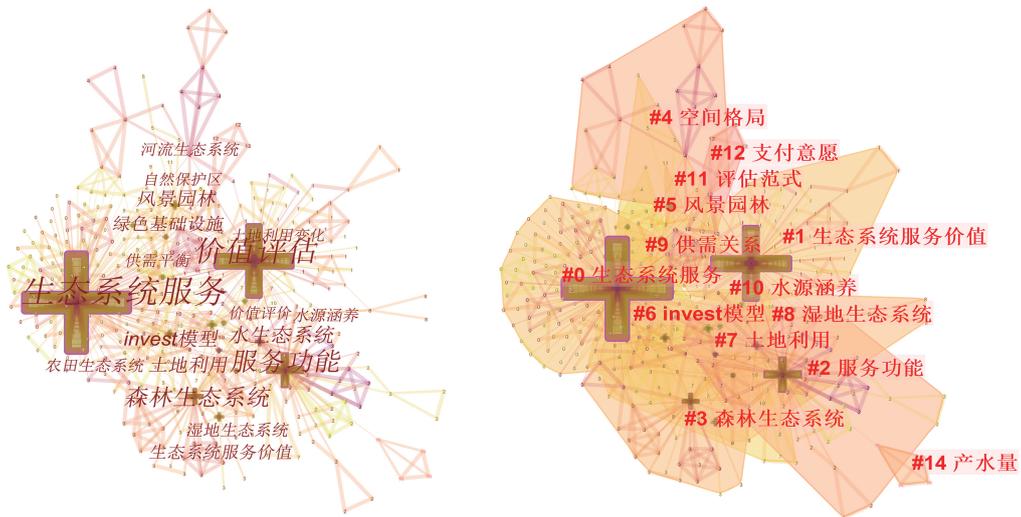


图 1 关键词共现网络与聚类分析图谱(CNKI)

Fig.1 Keywords Co-occurrence Network and Cluster Analysis Map (CNKI)

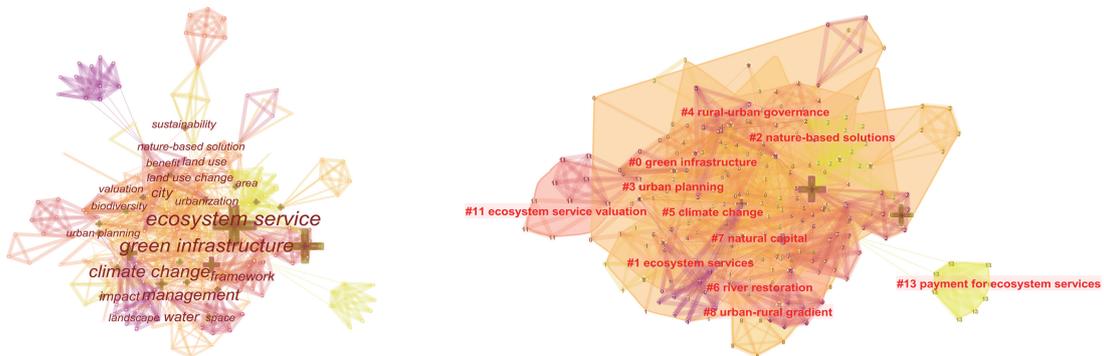


图 2 关键词共现网络与聚类分析图谱(WoS)

Fig.2 Keywords Co-occurrence Network and Cluster Analysis Map (WoS)

国内研究呈现:(1)对 GI 价值量化与管理保护研究较多,自 2013 年 InVEST 模型应用于 ES 评价起^[15-16],GI 物质量化研究呈上升趋势。(2)早期研究多关注湿地、河流与森林等区域尺度 GI,自 2013 年西安市绿地 ES 及空间格局研究起^[17],对城市绿地、公园等城市与社区尺度 GIES 的关注持续上升。(3)2015 年起,绿地生态网络建设^[2]、流域规划管理^[11]、GI 规划^[18]与生态网络构建^[19]等关键词出现,研究更加关注不同尺度下如何耦合人类社会发展与自然生态系统以促进生态空间优化。(4)对屋顶花园、透水铺装等小尺度 GIWES 的研究较少。国外研究呈现:(1)有关 GIES 量化评价-供需均衡分析-规划设计的研究框架较多。(2)对 GI 的雨洪调节服务研究较为深入,研究对象多为城市绿地、雨水花园与屋顶农业^[21]等城市与社区尺度 GI。(3)注重 GI 在城市可持续发展与生态韧性方面的应用,如运用基于自然的解决方案对城市 GI 进行规划设计以缓解城市水问题^[22-24]。国内外研究呈现出如下共性:(1)WES 分类研究多基于水生态系统功能、过程、类型与人类最终收益等进行探讨^[25]。(2)持续关注气候与土地利用变化影响下 WES 变化特征及保护管理措施。(3)在 ES 供需评价与 GI 规划设计相结合方面取得了初步进展,但多数研究仅考虑单项 WES 评价指标,系统梳理 GIWES 的研究并不多见。

2 概念内涵、评价内容与方法

2.1 概念内涵

如表 1 所示,GIWES 包括四大类、八中类服务类型^[26]。根据 ES 供需相关研究^[27],GIWES 供给主要由由不同尺度的 GI 所提供的水资源、水产品及与水相关的 ES,由实际供给、潜在供给和总量供给构成。GIWES 需求主要指人类对不同尺度 GI 所提供的水资源、水产品及与水相关的 ES 消费与使用,由实际需求、潜在需求和总量需求构成。

表 1 绿色基础设施水生态系统服务供给与需求的概念内涵

Table 1 Green infrastructure water ecosystem service supply and demand conceptual connotation

服务类型 Type of service		服务供给 Supply service	服务需求 Demand service
调节服务 Regulation service	雨洪调节	通过绿色基础设施的降雨截留、调蓄、下渗和排水等水文过程,起到延迟径流峰现时间、削减径流总量的作用,从而实现雨洪水径流的管控 ^[4]	为避免水灾害如城市内涝、洪水,人类社会需要绿色基础设施进行径流管控的总量
	污水净化	通过绿色基础设施的过滤、沉淀、吸附等过程,实现对污水的拦截	为改善水体环境与质量,需要利用绿色基础设施拦截外部污水,营造良好的水环境
	水体自净	受污染的水体经过物理、化学、生物等过程,恢复到受污染以前的状态,实现水体自身的净化 ^[28]	为维持良好的水生态系统,外界污染物输入不能超出水体自净能力,此时水体自身所能承载的污染物最大净化能力
	水土保持	绿色基础设施通过自身结构功能减少水流对土壤的侵蚀	通过采取措施减少的实际土壤侵蚀量 ^[29]
供给服务 Supply service	补充淡水	通过绿色基础设施的降雨截留、土壤持水、地下水补给等水文过程,实现淡水的补充	地表水体维持特定的生态环境功能所必须蓄存和消耗的最小水量,即生态环境需水量 ^[30]
支持服务 Support service	维持滨水植物、野生动物多样性	绿色基础设施为滨水动植物提供多样化的生境类型	绿色基础设施周边城乡环境对生境基础的需求 ^[31]
文化服务 Cultural service	提高美感度	绿色基础设施为公众提供具有美学欣赏价值的水景观	公众对绿色基础设施的文化、心理需求
	增加游憩机会	绿色基础设施为公众提供滨水游憩空间	公众对绿色基础设施的社会需求

2.2 评价内容与方法

如表 2,GIWES 供给评价多集中在区域、城市和流域尺度,测度单元包括土地利用单元、流域/生境等环境单元、行政单元或栅格单元等。供给评价需明确不同类型的评价指标,筛选评价模型,进行数据收集、计算与模型模拟。所需基础数据包括土地覆盖/土地利用、土壤属性、气候与降水、环境基础设施等。GIWES 需求评价可通过不同维度体现:一是经济维度,指直接或间接的使用、消费或从生态系统服务产品及服务中获益;一

是社会维度,通过人的愿望、偏好或需求来体现^[32]。因此需求评价常用的指标包括消费、偏好、感知或经济价值指标等。对于水的供给服务需求通常基于直接使用和消费进行量化^[33]。对水调节服务的需求量化常用社会和经济对生态系统状态潜在变化的暴露和损害进行表示^[34-36]。对水的支持服务和文化服务的需求多用偏好和价值属性来表示。

表 2 绿色基础设施水生态系统服务供需评价方法

Table 2 The evaluation method of water ecosystem service supply-demand for green infrastructure

方法分类 Method classification	具体评价方法 Specific evaluation method	服务类型 Type of service						
		调节服务 Regulation service			供给服务 Supply service	支持服务 Support service	文化服务 Cultural service	
		雨洪 调节	水质 净化	水土 保持	补充 淡水	维持滨水植物、 野生动物多样性	提高 美感度	增加游 憩机会
生态模型法 Ecological model method	InVEST 模型 RULSE 模型 ARIES 模型 SolVES 模型 城市暴雨内涝模型(水 文模型、水动力模型、水 质模型) 生态位模型	○	○◇	○◇	○	○	○	○
价值评价法 Value evaluation method	单位面积价值当量法 市场价值法	○◇	○◇	○◇	○◇	○◇	○◇	○◇
参与调查法 Participation investigation method	问卷调查法 专家评价法	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇
经验模型法 Empirical model method	参数模型、公式	○◇	○◇	○◇	○◇	○◇	○◇	○◇

○表示适用于供给评价,◇表示适用于需求评价

2.2.1 调节服务

调节服务供给评价包括雨洪调节、水质净化及水土保持等。较多研究利用 SWAT、KINEROS、STREAM 等水文模型,通过模拟截留、入渗和地表径流等水文过程评价调节服务^[34-36]。如 Wang 等^[37]应用 SWAT 模型量化评价了流域尺度下 GI 的水质净化、水土保持、洪水调蓄的服务供给。也可利用土地利用矩阵评价法,如 Cai 等^[38]邀请专家对不同土地覆盖类型的三种调节服务打分,通过整合土地覆盖类型分值与面积评价调节服务供给。也可以结合上述两种评价方法,如 Stürck 等^[36]利用 STREAM 模型结合地形、降雨、土壤、植被等计算洪水调节的实际供给,利用情景分析结合土地覆盖、土地利用与管理等计算增强的调节服务作为潜在供给; Nedkov 等^[34]利用水文模型 KINEROS 和 AGWA 计算流域尺度内洪峰河流流量和不同土地覆盖类型调节洪水能力的的数据,结合专家经验、土地利用等,对洪水调节 ES 供给进行量化和制图。除此之外,运用经验统计模型法、生态模型中的 InVEST 与 ARIES 等也可对调节服务展开评价。如 Wei 等^[39]在流域尺度运用水土流失方程、水量平衡方程量化水土保持、水量调节等服务的供给;Gaglio 等^[40]利用 InVEST 模型量化模拟了自然保护区单元内的水调节服务供给。

调节服务的需求评价多针对于雨洪调节、水质净化。主要评价方法为问卷调查法、土地利用矩阵评价法和经验统计模型法。如 Castro 等^[41]利用问卷调查法收集受访者对美国中南部的凯厄米希河流域 ES 的重要性排序,以此衡量流域内调节服务的需求。Cai 等^[38]基于专家对水土保持、洪水调节和水质净化服务的需求评分,结合土地覆盖面积量化 ES 需求。Stürck 等^[36]利用洪涝灾害的敏感性区域作为洪水调节服务需求的空

铺装比例^[42]或根据数字化高程模型与土地利用数据^[34]来评价雨洪调节服务的需求。

2.2.2 供给服务

供给服务主要为淡水的补充与供给,评价指标包括地下水回补量、产水量、水的可再生能力等,测度单元包括流域、行政单元尺度等。水文模型评价法应用较多,如 Wang 等^[37]、Chen 等^[43]运用 SWAT 模型对流域产水量进行估算;Quintas-Soriano 等^[35]用 APLIS 模型模拟维持水基流量的潜在含水层补给;Boithias 等^[44]、Kroll 等^[45]通过土壤覆盖类型、降雨量、植被蒸腾量、环境流量、土壤特性等指标计算人类可获得的水供给服务;Karabulut 等^[46]利用水的可再生能力衡量水的供给服务,指标包括地表水资源、可获取的绿水、地下水资源回补量等。除此之外,还可应用生态系统服务模型评价法对 GI 的水供给能力进行评价。

供给服务的需求评价指标为需水量,通过经验统计模型估算用水量表征淡水供给的需求。如 Karabulut 等^[46]利用水的使用衡量水供给服务的需求,指标包括公众用水、农业用水、畜牧业用水、能源用水、工业用水、环境基流需要、实际的绿水消耗等。也可以利用土地利用/土地覆被数据矩阵评价法对供给服务的需求进行量化。如 Chen 等^[43]利用延河流域的土地利用数据和农业、工业、生活、林牧渔业和畜牧业的年用水量统计数据,建立土地利用类型与用水量之间的关联,评价和绘制与土地利用变化相关的供水服务需求。除此之外,社会文化偏好评价法亦可衡量公众对流域内淡水供应的需求^[41]。

2.2.3 支持服务

支持服务主要指水在维持滨水生境与野生动物多样性方面的服务,可用滨水生境评价表征服务供给,测度单元为生境单元。利用 InVEST 模型中的生境质量模块对栖息地环境质量进行评价^[39],或运用 BCI 模型模拟受威胁物种的保护水平表征栖息地维持质量^[42]。也可利用生态位模型(MaxEnt)对未知区域的物种分布概率进行预测,表征物种分布的适宜程度^[47]。此外还可利用山地河流生境快速评价模型^[48]、城市河流滨岸带生境综合指数^[49]等生境评价模型展开评价。支持服务的需求评价主要集中于对动植物栖息地的需求,测度单元多为流域/生境等环境单元尺度,评价方法主要为问卷调查法。如 Wei 等^[39]利用问卷调查法获取栖息地支持服务在所有 ES 中的重要性占比,表征利益相关者对于该服务的需求水平。

2.2.4 文化服务

与水相关的文化服务包括游憩、审美、教育及心理疗愈等。主要评价方法有土地利用矩阵评价法和货币价值评价法。如 Egarter 等^[50]以美学体验为例,利用基于专家的土地利用矩阵分析表征意大利 Puez-Geisler 自然公园的文化服务的供给潜力。Kulczyk 等^[51]提出游憩服务的供给包括环境基础(景观、固有景观潜力、服务景观潜力)和支持要素(休闲娱乐服务设施),识别、标记了马苏里安湖 27 种基于水的游憩服务类型并量化了货币价值。除此之外,还可利用休闲游憩潜力、可达性等指标评价文化服务供给^[52]。

需求评价内容侧重于对审美、游憩活动的需求,可采用公众美学偏好^[52]、开展水资源活动的意愿^[51]以及到访率来表征对水文化 ES 的需求。评价方法以问卷调查为主。如 Vierikko 等^[53]通过面对面半结构化访谈的方式研究了芬兰万塔市的 Kuusijarvi 湖泊夏季和非夏季游客对于水文化服务不同的游憩需求。Assmuth 等^[54]以赫尔辛基大都会地区为例,由不同部门的 12 个专家采用“角色椅”法对 12 个人群亚类进行观察分析,从游客的角度考虑了不同人群对蓝色基础设施的娱乐使用需求。除此之外,还可通过问卷调查获取受访者对提高河湖水质,以进行游泳、划船或钓鱼等活动的支付意愿,由此反映出的社会偏好,常被用于绘制 ES 需求图^[55]。

2.3 评价方法优缺点对比与选取原则

如表 3,GIWES 供需评价方法可分为生态模型法、价值评价法、参与调查法和经验模型法。生态模型法能够较好的揭示生态机理,模拟生态过程,基于环境图层与参数对生态功能进行定量评价,反馈运算过程并将数据结果可视化。然而该方法所需数据量较大,数据处理过程较为复杂,评价结果易受模型内部算法与经验参数设置影响,模拟结果的验证方法不足。价值评价法操作较为简单,可评价供需双方,评价结果无量纲差异,便于比较,适用尺度较广。参与调查法能够较为真实的反映公众的需求水平,但耗时费力,具有主观性影响。

参数模型/公式方法简单易操作,所需运算数据类型相对较少,但对生态功能与生态过程的表征较差。

表 3 评价方法适用尺度及优缺点对比

Table 3 Applicable scale of evaluation method and comparison of advantages and disadvantages

方法分类 Method classification	具体评价方法 Specific evaluation method	模型适用范围 Scope of application of the model	优点 Advantage	缺点 Disadvantage	参考文献 References
生态模型法 Ecological model method	InVEST 模型	全球、区域、流域、城市	可量化评价多种 WES 供给,部分模块可核算 WES 价值	无法对小尺度区域展开评价,数据处理过程较为复杂	[59]
	RULSE 模型	区域、流域、城市	能够量化评价土壤保持服务供需,各运算因子的校正可参考已有研究	对土壤调查数据要求较高,水土保持措施因子的选取缺少统一标准	[60]
	ARIES 模型	全球、区域、流域、城市	可量化评价 WES 供需并对生态系统服务流进行分析,操作简单	对数据分辨率要求较高,国内目前不能使用该模型	[61]
	SolVES 模型	城市、社区	可将问卷数据进行价值转换与空间制图,根据调查数据与所在区域的环境特征关系模拟其他区域的服务能值分布情况	仅可评价文化服务供给,需收集大量问卷数据,调研大尺度区域花费投入较高,内置参数的设定无法体现区域差异	[62]
	城市暴雨内涝模型 (水文模型、水动力模型与水质模型)	流域、城市、社区	可模拟雨洪水调节服务动态过程,模拟淹没范围、时间与深度,分析污染物的扩散迁移过程结果,对小尺度研究范围的量化较为精确	建模过程复杂,气象与给排水管网数据的获取存在困难	[63]
	生态位模型	全球、区域、流域、城市	在调研样本量较小的情况下量化结果的精度和稳定性较高,对影响物种分布的环境因子识别较为准确	仅可量化支持服务供给,物种监测点的分布对量化结果的影响较大	[64]
价值评价法 Value evaluation method	单位面积价值当量法	全球、区域、流域、城市	该方法开发较早,应用较为成熟,谢高地等提出的生态服务当量因子表较为符合中国国情	当量参考值与研究区域实际存在偏差,无法体现同类生态系统的内部差异	[65]
	市场价值法	全球、区域、流域、城市	数据结果便于不同专业人员理解并可纳入国民经济核算体系	缺少市场交易价格的 WES 无法直接核算,无法进行空间可视化,市场价格的波动会对评价结果产生影响	[66]
参与调查法 Participation investigation method	问卷调查法	城市、社区	对小尺度区域文化服务需求侧的研究应用较多	需收集大量问卷数据抵消受访者主观性误差,各服务类型的权重赋值受研究者的主观性影响	[67]
	专家评价法	全球、区域、流域、城市	可量化评价 WES 供需,数据精度取决于对遥感影像的解译,评价结果无量纲差异	结果易受专家经验与认知水平影响,无法揭示同一土地覆被/土地利用类型内部差异	[68]
经验统计模型法 Empirical model method	参数模型/公式	全球、区域、流域、城市、社区	主要应用于评价 WES 需求,研究数据的计算处理过程较为简单	小尺度区域部分数据(人口分布、土壤流失与水质数据等)的获取与空间可视化存在困难	[69]

WES: 与冰相关的生态系统服务 Water-related ecosystem service

通过梳理归纳傅伯杰等^[56]、姜芊孜等^[57]、陈尚等^[58]学者关于 ES 评价体系设立原则的研究结果,针对评价方法选用提出如下 4 项原则:(1)可操作性原则。对目标测度服务的评价科学合理,评价方法操作便捷,量化过程数据可获取并具有权威性,量化结果客观性强。(2)可对比性原则。便于对比不同测度服务类型、相同服务类型供需的量化结果,可对 GIWES 的区域差异与不同 GI 类型的 WES 差异进行探究。(3)尺度适宜性原则。适用于相应的研究区域尺度。(4)可推广性原则。评价方法选用与组合可形成范式,易被大多数人理解应用。各评价方法关键参数的确定应基于研究区域的生态特征,尽可能与生态功能、过程相贴合。

3 供需服务均衡分析

WES 供需均衡分析包括动态与静态分析^[43]。生态系统服务流(ESF)是 ES 供需动态均衡分析的重要途径,可反映 ES 在不同空间尺度下的传递时间、方向、速度、依托载体与 ES 受益区可获得的最终服务量^[70]。该特征量将 ES 产生区(SPA)与受益区(SBA)联系起来,对 ES 转移规律进行分析,揭示供需动态均衡状况。空间分布式模型可直观反映 ES 传递过程,但所需数据较多,测算过程存在一定困难^[71]。

供需静态均衡分析包括数量与空间均衡分析。数量均衡分析有数学模型法与统计图法。数学模型法应用较多,主要利用数学公式对栅格数据进行计算。(1)相对极差/偏差法:利用供需差值除以供需最大值的平均数计算供需服务偏离程度,基于结果划分为盈余、赤字、平衡三类状态^[72-73]。(2)差值法:将供需服务栅格数据结果直接作差反映供需均衡状况^[38,74]。(3)比值法:将供需比值结果作为识别供需差异的基础^[43,75]。由相对极差/相对偏差公式计算得出的供需均衡数值无量纲,能够将值域控制在-2—2 范围内,便于供需等级划分;差值法对价值评价法与专家评价矩阵法较为适用,基于价值评价法的差值计算可体现供需价值差异,结果通俗易懂,可为管理者提供决策参考,基于专家评价矩阵法的供需差值为整数且值域范围为-5—5,可较为直观的体现各区域服务类型数量供需匹配程度;比值法所得结果值大于 0 且值域范围较广,对供需严重不均衡的识别较为方便。若缺少供需服务评价结果的栅格数据,可运用统计图法如雷达图^[76]、条形图^[55,77]与象限图^[2]等进行供需数量均衡分析。

空间均衡分析可通过 ES 制图与对比分析法实现。ES 制图是利用自然间断点分级法或根据相应阈值将数学模型分析法得出的栅格数据结果划分为不同水平等级,并将各测度单元与水平等级用不同图例进行表示。该方法可较为直观的反映出研究区不同空间位置的 WES 的平衡状态。对比分析法需结合供需数量均衡分析结果,识别各子研究区域内部的服务供需匹配状态,再将各子研究区之间的供需差异程度进行对比,快速得出 WES 供需空间均衡结果。

目前关于 WES 供需动态均衡分析文献较少,无法识别 SPA、SBA 的具体位置,缺少对 ESF 传输与变化过程的研究,在城市生态环境变化情况下无法为维持 WES 供需动态均衡提供解决措施。关注 WES 供需静态均衡分析的文献相对较多,部分研究根据供需主体的数量差异与空间分异特征进行生态空间优化,为 GI 的构建提供参照。

4 结论与展望

ES 供给与需求是生态学、地理学领域的研究前沿与热点,随着城市规划、风景园林领域学者对 GIES 研究的深入,亟需在供给与需求视角下展开相关理论探讨与实证研究。通过对中国知网与 Web of Science 数据库进行主题检索,分析 GIWES 供需领域 491 篇相关文献。研究内容方面,国外注重 GI 在缓解城市水问题方面的应用,国内聚焦 GIWES 价值评价、GI 管理保护与空间优化。空间尺度方面,国外研究集中于城市与社区尺度,国内聚焦区域与流域尺度,近年来对城市与社区尺度关注上升。服务类型方面,GIWES 系统性研究较少,已有研究聚焦调节、供给服务,针对雨洪调节、水质净化、水土保持与淡水补给等服务类型构建了供需评价体系,但测度指标的合理性与系统性仍需进一步加强。评价方法方面,多利用生态模型法评价服务供给,利用问卷调查与经验模型统计法评价服务需求。但生态模型法存在模型参数校正困难、部分服务模拟结果难以验证等问题;问卷调查法适用于小尺度研究范围,数据结果易受参与者主观性影响;经验模型统计法可整合社会指标数据反映需求总量,但缺少对利益相关者真实需求的关注。供需均衡分析方面,数量与空间的静态均衡研究较多,动态均衡研究有待深入,ESF 传递过程的定量研究较为缺乏。

基于上述研究现状与发展动态分析发现,未来 GIWES 供需评价研究应从体系构建、供需评价、评价精度、均衡分析与空间优化五方面进一步深入。(1)构建多尺度 GIWES 供需评价指标体系。针对区域、城市与社区尺度 GI,识别 GIWES 的供给与需求主体,构建供需测度指标与评价体系。(2)探索 GIWES 供需评价的集

成方法。目前,供需评价的涉及方法、尺度较多,面临整合多种评价结果与方法的困难,应加强集供需评价于一体的生态模型研发。(3)提高 GIWES 供需评价精度。对比多个评价方法选取最佳评价方案,建立标准化的数据收集处理与运算分析流程,提高地理空间数据、统计数据与监测数据等量化数据的精度,规范量化数据的插值分析、重采样分析与叠加分析等空间处理过程,结合研究区域特征修正相关参数。(4)加强 GIWES 供需动态均衡分析研究。加强对空间分布式模型的研发应用,实现 WES 从供给区到需求区动态过程模拟。(5)探索 GIWES 优化策略。将 GIWES 供需评价结果纳入不同尺度 GI 规划、设计与管理中,探索区域、城市和社区尺度 GIWES 提升的优化策略。

参考文献(References):

- [1] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [2] 彭建, 杨咏, 谢盼, 刘焱序. 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.
- [3] Hackbart V C S, de Lima G T N P, dos Santos R F. Theory and practice of water ecosystem services valuation: where are we going? *Ecosystem Services*, 2017, 23: 218-227.
- [4] 颜文涛, 黄欣, 王云才. 绿色基础设施的洪水调节服务供需测度研究进展. *生态学报*, 2019, 39(4): 1165-1177.
- [5] Benedict M, MacMahon E. Green infrastructure: smart conservation for the 21st century. *Renewable Resources Journal*, 2002, 20(3): 12-17.
- [6] 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——以西安市为例. *生态学报*, 2019, 39(24): 9211-9221.
- [7] 刘滨谊, 张德顺, 刘晖, 戴睿. 城市绿色基础设施的研究与实践. *中国园林*, 2013, 29(3): 6-10.
- [8] 闫攀, 车伍, 赵杨, 李俊奇, 王思思. 绿色雨水基础设施构建城市良性水文循环. *风景园林*, 2013(2): 32-37.
- [9] Costanza R. Ecosystem services: multiple classification systems are needed. *Biological Conservation*, 2008, 141(2): 350-352.
- [10] Fisher B, Turner R K, Morling P. Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological Economics*, 2009, 68(3): 643-653.
- [11] 白杨, 王敏, 李晖, 黄沈发, Juha M. Alatalo. 生态系统服务供给与需求的理论与管理方法. *生态学报*, 2017, 37(17): 5846-5852.
- [12] 江波, 蔡金洲, 杨梦斐, 王晓媛. 基于供需耦合机制的流域水生态系统管理. *生态学杂志*, 2018, 37(10): 3155-3162.
- [13] 刘颂, 杨莹, 王云才. 基于矩阵分析的水文调节服务供需关系时空分异研究——以嘉兴市为例. *生态学报*, 2019, 39(4): 1189-1202.
- [14] Peng J, Wang A, Luo L W, Liu Y X, Li H L, Hu Y N, Meersmans J, Wu J S. Spatial identification of conservation priority areas for urban ecological land: an approach based on water ecosystem services. *Land Degradation & Development*, 2019, 30(6): 683-694.
- [15] 白杨, 郑华, 庄长伟, 欧阳志云, 徐卫华. 白洋淀流域生态系统服务评估及其调控. *生态学报*, 2013, 33(3): 711-717.
- [16] 赵金龙, 王添鑫, 韩海荣, 康峰峰, 张彦雷. 森林生态系统服务功能价值评估研究进展与趋势. *生态学杂志*, 2013, 32(8): 2229-2237.
- [17] 胡忠秀, 周忠学. 西安市绿地生态系统服务功能测算及其空间格局研究. *干旱区地理*, 2013, 36(3): 553-561.
- [18] 王云才, 申佳可, 彭震伟, 象伟宁. 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.
- [19] 李倩, 吴雅华, 李佳芯, 刘燕, 刘兴诏, 黄柳菁. 基于生态系统服务供需关系的福州绿地生态网络构建分区. *西北林学院学报*, 2022, 37(2): 238-247.
- [20] Ishimatsu K, Ito K, Mitani Y, Tanaka Y, Sugahara T, Naka Y. Use of rain gardens for stormwater management in urban design and planning. *Landscape and Ecological Engineering*, 2017, 13(1): 205-212.
- [21] Harada Y, Whitlow T H, Todd Walter M, Bassuk N L, Russell-Anelli J, Schindelbeck R R. Hydrology of the Brooklyn Grange, an urban rooftop farm. *Urban Ecosystems*, 2018, 21(4): 673-689.
- [22] Krauze K, Wagner I. From classical water-ecosystem theories to nature-based solutions - Contextualizing nature-based solutions for sustainable city. *The Science of the Total Environment*, 2019, 655: 697-706.
- [23] Snep R P, Voeten J G, Mol G, van Hattum T. Nature based solutions for urban resilience: a distinction between no-tech, low-tech and high-tech solutions. *Frontiers in Environmental Science*, 2020, 8: 599060.
- [24] Grace M, Balzan M, Collier M, Geneletti D, Tomaskinova J, Abela R, Borg D, Buhagiar G, Camilleri L, Cardona M, Cassar N, Cassar R, Cattafi I, Cauchi D, Galea C, La Rosa D, Malekkidou E, Masini M, Dicks L V. Priority knowledge needs for implementing nature-based solutions in the Mediterranean Islands. *Environmental Science & Policy*, 2021, 116: 56-68.
- [25] 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. *资源科学*, 2019, 41(7): 1189-1200.
- [26] 汪洁琼, 邱明, 成水平, 庞磊. 基于水生态系统服务综合效能的空间形态增效机制——以岷泗田番水敏性乡村为例. *风景园林*, 2017(1): 82-90.
- [27] 马琳, 刘浩, 彭建, 吴健生. 生态系统服务供给和需求研究进展. *地理学报*, 2017, 72(7): 1277-1289.

- [28] 谭夔, 陈求稳, 毛劲乔, 李伟峰. 大清河河口水体自净能力实验. *生态学报*, 2007, 27(11): 4736-4742.
- [29] 赵雪雁, 马平易, 李文青, 杜昱璇. 黄土高原生态系统服务供需关系的时空变化. *地理学报*, 2021, 76(11): 2780-2796.
- [30] 李丽娟, 郑红星. 海滦河流域河流系统生态环境需水量计算. *海河水利*, 2003(1): 6-8, 70.
- [31] 王云才, 熊哲昊. 城市生态复兴中“供需适应”的绿色基础设施及其发展. *城市建筑*, 2018(33): 6-10.
- [32] Wolff S, Schulp C J E, Verburg P H. Mapping ecosystem services demand: a review of current research and future perspectives. *Ecological Indicators*, 2015, 55: 159-171.
- [33] Burkhard B, Kroll F, Nedkov S, Müller F. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets. *Ecological Indicators*, 2012, 21: 17-29.
- [34] Nedkov S, Burkhard B. Flood regulating ecosystem services—mapping supply and demand, in the Etropole municipality, Bulgaria. *Ecological Indicators*, 2012, 21: 67-79.
- [35] Quintas-Soriano C, Castro A J, García-Llorente M, Cabello J, Castro H. From supply to social demand: a landscape-scale analysis of the water regulation service. *Landscape Ecology*, 2014, 29(6): 1069-1082.
- [36] Stürck J, Poortinga A, Verburg P H. Mapping ecosystem services: the supply and demand of flood regulation services in Europe. *Ecological Indicators*, 2014, 38: 198-211.
- [37] Wang L J, Zheng H, Wen Z, Liu L, Robinson B E, Li R N, Li C, Kong L Q. Ecosystem service synergies/trade-offs informing the supply-demand match of ecosystem services: framework and application. *Ecosystem Services*, 2019, 37: 100939.
- [38] Cai W B, Wu T, Jiang W, Peng W T, Cai Y L. Integrating ecosystem services supply-demand and spatial relationships for intercity cooperation: a case study of the Yangtze River Delta. *Sustainability*, 2020, 12(10): 4131.
- [39] Wei H J, Liu H M, Xu Z H, Ren J H, Lu N C, Fan W G, Zhang P, Dong X B. Linking ecosystem services supply, social demand and human well-being in a typical mountain-oasis-desert area, Xinjiang, China. *Ecosystem Services*, 2018, 31: 44-57.
- [40] Gaglio M, Aschonitis V, Pieretti L, Santos L, Gissi E, Castaldelli G, Fano E A. Modelling past, present and future Ecosystem Services supply in a protected floodplain under land use and climate changes. *Ecological Modelling*, 2019, 403: 23-34.
- [41] Castro A J, Vaughn C C, Julian J P, García-Llorente M. Social demand for ecosystem services and implications for watershed management. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 2016, 52(1): 209-221.
- [42] Cortinovis C, Geneletti D. A performance-based planning approach integrating supply and demand of urban ecosystem services. *Landscape and Urban Planning*, 2020, 201: 103842.
- [43] Chen D S, Li J, Yang X N, Zhou Z X, Pan Y Q, Li M C. Quantifying water provision service supply, demand and spatial flow for land use optimization: a case study in the YanHe watershed. *Ecosystem Services*, 2020, 43: 101117.
- [44] Boithias L, Acuña V, Vergoñós L, Ziv G, Marcé R, Sabater S. Assessment of the water supply: demand ratios in a Mediterranean Basin under different global change scenarios and mitigation alternatives. *The Science of the Total Environment*, 2014, 470/471: 567-577.
- [45] Kroll F, Müller F, Haase D, Fohrer N. Rural-urban gradient analysis of ecosystem services supply and demand dynamics. *Land Use Policy*, 2012, 29(3): 521-535.
- [46] Karabulut A, Egoh B N, Lanzanova D, Grizzetti B, Bidoglio G, Pagliero L, Bouraoui F, Aloe A, Reynaud A, Maes J, Vandecasteele I, Mubareka S. Mapping water provisioning services to support the ecosystem-water-food-energy Nexus in the Danube River Basin. *Ecosystem Services*, 2016, 17: 278-292.
- [47] Huang Z D, Bai Y, Alatalo J M, Yang Z Q. Mapping biodiversity conservation priorities for protected areas: a case study in Xishuangbanna Tropical Area, China. *Biological Conservation*, 2020, 249: 108741.
- [48] 王强, 袁兴中, 刘红, 张跃伟. 山地河流生境快速评价模型与应用. *水利学报*, 2011, 42(8): 928-933.
- [49] 施展. 平原河网地区城市河流滨岸带生境评价研究——以上海市苏州河为例[D]. 上海: 华东师范大学, 2008.
- [50] Egarter Vigl L, Depellegrin D, Pereira P, de Groot R, Tappeiner U. Mapping the ecosystem service delivery chain: capacity, flow, and demand pertaining to aesthetic experiences in mountain landscapes. *The Science of the Total Environment*, 2017, 574: 422-436.
- [51] Kulczyk S, Woźniak E, Derek M. Landscape, facilities and visitors: an integrated model of recreational ecosystem services. *Ecosystem Services*, 2018, 31: 491-501.
- [52] Peña L, Casado-Arzuaga I, Onaindia M. Mapping recreation supply and demand using an ecological and a social evaluation approach. *Ecosystem Services*, 2015, 13: 108-118.
- [53] Vierikko K, Yli-Pelkonen V. Seasonality in recreation supply and demand in an urban lake ecosystem in Finland. *Urban Ecosystems*, 2019, 22(4): 769-783.
- [54] Assmuth T, Hellgren D, Kopperoinen L, Paloniemi R, Peltonen L. Fair blue urbanism: demands, obstacles, opportunities and knowledge needs for just recreation beside Helsinki Metropolitan Area waters. *International Journal of Urban Sustainable Development*, 2017, 9(3): 253-273.
- [55] Wei H J, Fan W G, Wang X C, Lu N C, Dong X B, Zhao Y N, Ya X J, Zhao Y F. Integrating supply and social demand in ecosystem services

assessment: a review. *Ecosystem Services*, 2017, 25: 15-27.

- [56] 傅伯杰,于丹丹,吕楠.中国生物多样性与生态系统服务评估指标体系.生态学报,2017,37(02):341-348.
- [57] 姜芊孜,窦月含,任震.景观规划视角下的生态系统服务研究动态——第十届生态系统服务伙伴全球会议综述.景观设计学,2021,9(01):66-79.
- [58] 陈尚,任大川,夏涛,李京梅,杜国英,王栋,王其翔,张涛.海洋生态资本理论框架下的生态系统服务评估.生态学报,2013,33(19):6254-6263.
- [59] Bai Y, Wong C P, Jiang B, Hughes A C, Wang M, Wang Q. Developing China's Ecological Redline Policy using ecosystem services assessments for land use planning. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 3034.
- [60] 李佳蕾,孙然好,熊木齐,杨国成.基于RUSLE模型的中国土壤水蚀时空规律研究.生态学报,2020,40(10):3473-3485.
- [61] 韩宝龙,欧阳志云.城市生态智慧管理系统的生态系统服务评估功能与应用.生态学报,2021,41(22):8697-8708.
- [62] Zhao Q Q, Li J, Liu J Y, Cuan Y D, Zhang C. Integrating supply and demand in cultural ecosystem services assessment: a case study of Cuihua Mountain (China). *Environmental Science and Pollution Research International*, 2019, 26(6): 6065-6076.
- [63] 穆聪,李家科,邓朝显,李亚娇,张蓓,邓陈宁. MIKE模型在城市及流域水文——环境模拟中的应用进展.水资源与水工程学报,2019,30(2):71-80.
- [64] 张文秀,寇一翻,张丽,曾卫东,张志勇.采用生态位模拟预测濒危植物白豆杉5个时期的适宜分布区.生态学报,2020,39(2):600-613.
- [65] 谢高地,张彩霞,张雷明,陈文辉,李士美.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.自然资源学报,2015,30(8):1243-1254.
- [66] Turner R K, Paavola J, Cooper P, Farber S, Jessamy V, Georgiou S. Valuing nature: lessons learned and future research directions. *Ecological Economics*, 2003, 46(3): 493-510.
- [67] Quintas-Soriano C, García-Llorente M, Norström A, Meacham M, Peterson G, Castro A J. Integrating supply and demand in ecosystem service bundles characterization across Mediterranean transformed landscapes. *Landscape Ecology*, 2019, 34(7): 1619-1633.
- [68] Hou Y, Burkhard B, Müller F. Uncertainties in landscape analysis and ecosystem service assessment. *Journal of Environmental Management*, 2013, 127: S117-S131.
- [69] Chen J Y, Jiang B, Bai Y, Xu X B, Alatalo J M. Quantifying ecosystem services supply and demand shortfalls and mismatches for management optimisation. *The Science of the Total Environment*, 2019, 650(Pt 1): 1426-1439.
- [70] 刘慧敏,范玉龙,丁圣彦.生态系统服务流研究进展.应用生态学报,2016,27(7):2161-2171.
- [71] 王嘉丽,周伟奇.生态系统服务流研究进展.生态学报,2019,39(12):4213-4222.
- [72] Cui F Q, Tang H P, Zhang Q, Wang B J, Dai L W. Integrating ecosystem services supply and demand into optimized management at different scales: a case study in Hulunbuir, China. *Ecosystem Services*, 2019, 39: 100984.
- [73] 陈骏宇,王慧敏,刘钢,白杨.“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.长江流域资源与环境,2019,28(3):542-553.
- [74] 张平,朱翔,贺清云,欧阳晓.长江经济带生态系统服务供需时空分异与平衡格局分析.生态科学,2020,39(6):155-166.
- [75] 王壮壮,张立伟,李旭谱,李英杰,王鹏涛,延军平.区域生态系统服务供需风险时空演变特征——以陕西省产水服务为例.生态学报,2020,40(6):1887-1900.
- [76] 纪然,丁金华.基于水生态系统服务供需关系的苏南乡村空间形态重构.规划师,2019,35(20):5-12.
- [77] Castro A J, Verburg P H, Martín-López B, García-Llorente M, Cabello J, Vaughn C C, López E. Ecosystem service trade-offs from supply to social demand: a landscape-scale spatial analysis. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 132: 102-110.