

DOI: 10.5846/stxb201809152002

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): - .

Yan W T, Huang X, Wang Y C. Measurements of the supply and demand for the flood regulation ecosystem services of green infrastructure: A review. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(4): - .

绿色基础设施的洪水调节服务供需测度研究进展

颜文涛^{1,*}, 黄欣², 王云才¹

¹ 同济大学建筑与城市规划学院, 上海 200092

² 重庆大学建筑城规学院, 重庆 400045

摘要:绿色基础设施(green infrastructure, GI)可提供高效且可获取的洪水调节服务,其供需测度是提升服务水平的基础与前提,可为城市土地利用与绿色基础设施规划提供决策依据。以 GI 洪水调节服务供需为研究对象,梳理 GI 洪水调节服务供需的概念内涵、主体构成和尺度关系。回顾了 GI 洪水调节服务供需测度方法,包括土地利用测度法、生态系统测度法和洪水调蓄模型法等供应水平测度方法,以及风险评估法、洪水淹没模型法和经济损失法等需求水平测度方法。基于生态系统服务的供需关系,构建了 GI 洪水调节服务供需分析框架,通过供需数量均衡和空间匹配将供需关系分为四种情景,对应服务动态平衡、调整服务供需水平和服务流动机制 3 种调控手段。从服务测度重点、动态变化分析、供需阈值效能、服务流动机制等四个方面提出了未来研究方向,以期对绿色基础设施规划研究和生态系统服务管理与决策研究有所启示。

关键词:绿色基础设施;生态系统服务;洪水调节;供需测度;服务流动

Measurements of the supply and demand for the flood regulation ecosystem services of green infrastructure: A review

YAN Wentao^{1,*}, HUANG Xin², WANG Yuncai¹

¹ College of Architecture and Planning, Tongji University, Shanghai 200092, China

² Faculty of Architecture and Urban Planning, Chongqing university, Chongqing 400045, China

Abstract: Green infrastructure can provide efficient and accessible flood regulation ecosystem services; the measurement of supply and demand is the basis and prerequisite for improving ecosystem services and can provide decision-making information for land use planning and green infrastructure planning. This paper elaborates on the flood regulation ecosystem services of green infrastructure, including the conceptual connotation, main body composition, and relationship for each scale of supply and demand. Various methods of measurement for flood regulation service supply and demand are reviewed; the methods for supply measurement include land use method, ecosystem methods, and the flood storage model, while the methods for demand include the risk assessment method, flood submerged model, and economic loss statistics. Based on the existing research on the supply and demand of ecosystem services, we envisage a supply and demand analysis framework for flood regulation services. Through quantity balance and space matching for supply and demand, the relationship of supply and demand is divided into four scenarios. For each scenario, there are three regulation strategies: regulation for supply and demand toward dynamic balance, adjustment of supply and demand for quantity match, and service flow mechanism for the spatial match. Finally, we summarize deficiencies in the current research and propose future research directions with the aim of enlightening research on green infrastructure planning and ecosystem service management and decision-making.

基金项目:国家重点研发计划课题(2017YFC0505705);国家自然科学基金面上项目(51278504);国家自然科学基金面上项目(51678087)

收稿日期:2018-09-15; **修订日期:**2018-12-12

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yanwt@tongji.edu.cn

Key Words: green infrastructure; ecosystem service, flood regulation; supply and demand measurements; service flows

面对严峻的气候变化环境与极端气候事件下频繁的洪灾问题,绿色基础设施通过截留、调蓄、下渗等功能可减少径流、降低峰值、缩短持续时间等提供洪水调节服务^[1]。然而洪水调节服务的供应与需求在时间和空间上具有很强的分异性,且供需空间之间存在耦合关系^[2-3]。服务供需测度有助于管理和决策者充分理解生态系统服务供应和需求之间差异、数量、规模和动态以及供需之间的互动关系^[4],强化生态系统服务与人类福祉之间相互作用的理解,促进对生态系统和社会经济系统之间相互作用机制的进一步探索^[5],从而科学合理地进行生态系统服务管理,为城市土地利用规划^[6-7]、绿色基础设施规划^[8]、景观规划^[9-10]、灾害管理^[11]、流域规划^[12]、生物多样性规划^[13]等提供有效的工具。

当前研究在绿色基础设施(Green Infrastructure,以下简称 GI)生态系统服务的供应水平测度、需求水平测度、供需关系与匹配等方面均获得了一定成果。本文以区域尺度 GI 洪水调节服务为对象,总结 GI 洪水调节服务的概念内涵,回顾洪水调节服务供需测度方法,构建了 GI 洪水调节服务的供需分析框架,分析了目前研究存在的问题,提出了未来的研究方向,以期对绿色基础设施规划研究和生态系统服务管理与决策研究有所启示。

1 GI 洪水调节服务的供应与需求

传统研究从经济价值角度测度生态系统服务^[14],侧重于生态系统服务的供应能力^[15]。随着对生态系统服务的进一步认识,许多学者逐渐将研究扩展到生态系统服务的供应与需求过程,从服务供应能力扩展至服务价值与需求取向^[15],研究涉及各个尺度、不同目标和多个对象。基于已有研究解析 GI 洪水调节服务的供应和需求概念内涵、主体构成和尺度关系,有利于对服务供需测度方法的理解和优化。

1.1 GI 洪水调节服务供需的概念内涵

绿色基础设施 GI 在不同尺度上具有不同的生态系统服务功能与服务水平,区域尺度的 GI 是指相互连接的绿色空间网络,包括水系、湿地、森林、野生动物栖息地等自然区域,大型绿道、公园、风景名胜区等生态保护用地,具有生态价值的已开发用地以及其他大型绿色开放空间等^[17]。城市和社区尺度的 GI 是指城市公园绿地、雨水花园、渗透沟渠、雨水湿塘、雨水储存设施、可渗透铺装、屋顶绿化等^[18-19]。目前研究中多以区域尺度的 GI 为研究对象,也有少数研究测度城市尺度 GI 的洪水调节功能。

生态系统服务供应(supply)的概念为在生物物理属性、生态功能和特定时空下的社会环境特性等要素作用下生态系统提供的可利用的自然资源与服务^[20-21]。由此延伸的 GI 洪水调节服务供应可定义为“通过 GI 的径流调节、水体调蓄、土壤持水与下渗等水文过程,影响洪水频率、强度和持续时间等,对可能造成人类损失的水文现象所发挥的预防、减缓等作用”^[22-23]。从生态系统服务之间关系来看,洪水调节(flood regulation)服务是水调节(water regulation)服务的一部分功能,水调节是生态系统对自然界中水的各种运动变化所发挥的作用^[24],洪水调节则是生态系统对威胁人类福祉的水文过程所发挥的减缓作用。从服务供应方式来看,GI 洪水调节服务供应可分为间接调节和直接调节,直接调节是指为人类聚居区汛期多余的水量提供排除通道和存贮空间的生态过程,如泄洪通道和调蓄空间;间接调节是指通过 GI 的截留、下渗和蒸腾等生物物理过程,以减缓洪水形成概率和强度。GI 洪水调节服务供应不仅取决于土地覆盖类型和地形地貌的影响,还受到不同生态系统之间相互作用^[25]的影响,如植被枯落物对土壤持水能力的影响。

生态系统服务需求是人类可以从生态系统中获益的前提条件^[26]。目前学界针对洪水调节服务需求的定义尚未统一,但从生态系统服务需求概念的探讨中可以引申其定义。有学者认为生态系统服务需求的概念因服务类型而异,商品服务需求(如许多供应服务和少量文化服务)可以通过消费量或市场价格来衡量,非商品服务(如大多数调节服务、文化服务和支持服务)的需求可以定义为人类生存发展的前提、偏好或愿望^[27]。洪水调节服务需求是在人类面对水灾危害时产生的一种非商品服务^[12],获取该类服务的目的是排除水灾危

害、保障人类安全,可定义为人类社会对排除威胁其生存发展的需要,既是生存前提也是发展愿望,其本质是应该需要调节的洪水水量。需注意的是,GI 洪水调节服务的需求是指需要通过 GI 调节的洪水水量,应与通过灰色基础设施调节的水量区分开来。

1.2 GI 洪水调节服务供需的主体构成

目前有研究认为生态系统服务的供应概念包括潜在供应和实际供应:潜在供应反映了生态系统以可持续的方式为人类提供福祉的能力,而不考虑人类是否真正利用这些服务^[28],只需通过生物物理环境和土地覆盖测算服务供应水平;实际供应则反应了最终人类实际利用的服务量(即消费量),在潜在供应的基础上,还需考虑人类获取服务的技术途径和管理方法等^[29]。上述研究将潜在供应与实际供应的关系定义为潜在供应包含了实际供应。洪水调节服务有一定的定向性和定量性,洪灾管理决策时需要明确生态系统服务供应中的实际可用量。绿色基础设施可通过规划提升自身的供应能力,同时也会因为遭到破坏而失去一部分供应能力,因此实际供应会随技术发展而变化,潜在供应也会随绿色基础设施的状态而变化,甚至出现潜在供应小于当前实际供应的情况。笔者认为潜在供应为人类通过技术改进后可利用的供应量,与实际供应为耦合关系,因此笔者将洪水调节服务供应构成分为供应总量、潜在供应和实际供应三部分:供应总量为 GI 可调节的所有水量,包括水源涵养的部分功能;实际供应为实际调节的水量;潜在供应则为总量供应中由于人类技术水平或生态系统承载能力等因素而未利用的服务供应量。将潜在供应和实际供应定义为洪水调节服务中两个互补的部分,可以更透彻地审视绿色基础设施洪水调节服务当前水平及其未来前景,更有效地为洪灾管理和绿色基础设施规划提供决策依据。洪水调节服务是在下游平原地区存在受益者(人类及其社会系统)时才会发挥作用,许多服务供应主体存在巨大的潜力,GI 规划与管理实际上是强化将潜在供应转换为实际供应的过程(图 1)。

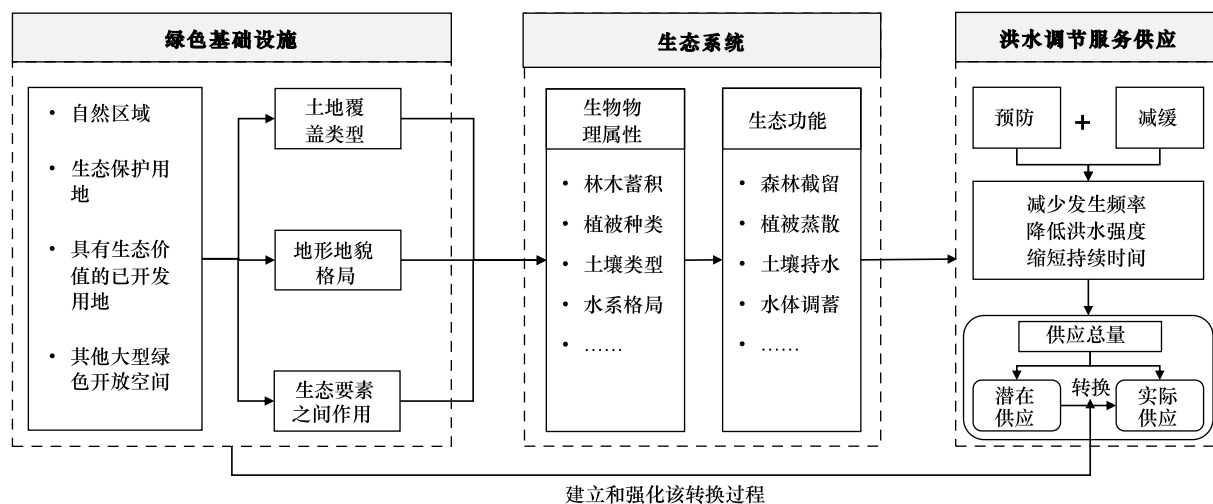


图 1 绿色基础设施与洪水调节服务供应关系

Fig.1 Relationship between green infrastructure and flood regulation supply

根据生态系统服务需求的概念,洪水调节服务需求包括总量需求、实现需求和潜在需求。总量需求是指保证流域内所有人类及其社会生命财产安全所需要排出的洪水总量,实现需求是指当前已经满足需求的部分洪水调节量,由于人类技术水平或生态系统承载能力等因素尚不能满足需求的部分洪水调节量则是潜在需求。需求主体之间存在相互作用和权衡关系,如满足流域上游需求时排出的洪水可能会对下游需求主体造成威胁。另外,需求主体的社会结构和经济水平可以影响服务需求水平。为了更好地理解需求主体之间的关系并制定高效有序的生态系统服务管理决策,在测度洪水调节服务需求水平时,应关注实现需求和总量需求的关系,即需求比(实现需求与总量需求的比值)越小,该区域的生态系统服务需求越强烈^[30],其中总量需求包含实现需求和潜在需求,需要考虑影响人口、社会和经济分布的土地利用等因素的变化趋势。

1.3 GI 洪水调节服务供需的尺度关系

生态系统服务供需匹配 (matching) 是指在某一时间点, 服务供应和服务需求在数量上和空间上的吻合^[31]。生态系统管理需要关注供应水平与需求水平不匹配的现象, 涉及时空尺度关系和数量关系^[5,32]。作为一种典型的方向性生态系统服务, 洪水调节的服务主体与需求主体之间存在明显的时空分异, 服务流动 (service flow) 路径中存在许多社会障碍和自然障碍^[10], 是导致洪水调节服务供需不匹配的主要原因^[33], 并在不同尺度上形成不同的供需关系 (图 2)。区域尺度上, 洪水调节服务供需空间关系多为供应空间与需求空间直接分离, 数量关系最常见的表现为潜在供应大于实际供应, 且总量需求大于实现需求, 即洪水调节服务不充分利用和需求不完全满足同时存在 (图 3)^[30]。洪水调节服务供需关系研究实际上是关注从供应端到需求端的服务连接过程 (生物物理过程和社会经济过程)^[27], 识别服务流动的关键因素, 确定服务流动区域, 最终形成服务供需网络并寻求供需平衡。城市尺度上, 洪水调节服务供需空间关系经常表现为供需空间相互穿插 (城市尺度的需求空间为易淹区域), 数量关系复杂, 但总体呈现需求大于供应的关系。

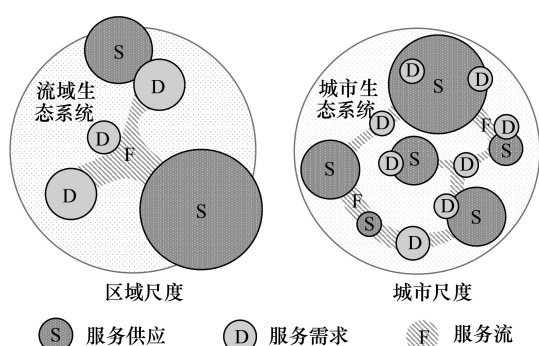


图 2 不同尺度洪水调节服务供需空间关系

Fig.2 Spatial relationship between flood regulation supply and demand on different scale

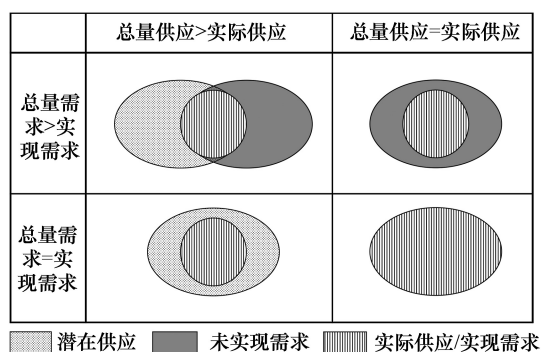


图 3 洪水调节服务供需数量关系

Fig.3 Quantitative relation between flood regulation supply and demand

2 GI 洪水调节服务供应测度方法

服务供应测度是评估生态系统状态的重要环节, GI 洪水调节服务供应测度方法包括土地利用测度法、生态系统测度法和洪水调蓄模型法。服务测度单元通常是同属性单元, 因测度方法而异, 如土地利用单元、环境单元 (如流域、生境)、行政单元或栅格单元等。

2.1 土地利用测度法

土地利用测度法是生态系统服务供应水平测度常用的方法, 即根据土地利用和土地性质对生态系统服务水平进行快速评价。该方法原型可追溯至 Costanza 等人于 1999 年提出的生态系统服务价值评价法^[14], 由 Burkhard 等人应用于生态系统服务的功能测度。此方法主要原理为基于研究区土地利用情况, 构建土地利用类型—生态系统服务功能矩阵, 并组织专家进行价值打分或分级, 将各类服务供应评价结果进行数理叠加, 形成生态系统服务综合评价^[15,34-35]。具体步骤为: ①系统划分研究区土地利用类型, 详细调研土地利用性质和开发强度等特征, 尤其是各类生态系统和生境单元的构成特征; ②构建土地利用类型—生态系统服务功能矩阵, 将四类生态系统服务展开形成一系列对应生态系统服务功能的评价因子, 作为矩阵模型的横列, 土地利用类型作为矩阵模型纵列。该方法中洪水调节服务供应水平的评价因子是土地利用和土地覆盖变化对径流、洪水和蓄水层的影响, 以用地的植被情况、下渗能力为判断依据。③组织专家进行打分或分级, 专家组由决策部门、研究学者、项目负责人和当地居民构成, 先分别评分再进行差异性校验和讨论形成最终结果; ④将评价结果进行可视化。土地利用测度法的弊端在于打分具有主观性, 取决于对土地利用性质的调查程度, 因此关键在于尽量准确的土地利用基础数据。该方法也可沿用于单功能服务的评估, 洪水调节服务供应测度可沿用该

方法进行快速评价,构建绿色基础设施用地类型—洪水调节服务功能矩阵,分别从降雨截留、调蓄、下渗、排水等功能进行评价(表1),可用于定性地识别洪水调节服务供应主体空间分布和能力高低。

表1 绿色基础设施用地类型—洪水调节功能矩阵

Table 1 Matrix of green infrastructure land use-flood regulation function

绿色基础设施用地类型 Green Infrastructure Land Use	洪水调节功能 Flood Regulation Function									
	降雨截留			调蓄		下渗		排水		
	树冠 截留	地被 截留	降低 流速	洼地 滞留	水体 调蓄	土壤 持水	地下水 补给	泄洪 通道	地形 坡度	与河流等 大型水体的 距离
公园绿地 ^[34] Garden	●	●	●	●	○	●	○	○	○	○
防护绿地 ^[34] Protective Green Space	●	●	●	●		●	●	●	●	○
草地 ^[34] Grass Land	○	●	○	○		●	●		○	○
湿地 ^[36] Wetland	○	○	○	●	●	○		●	○	○
河流 river			●	○	●	○	●	●	●	○
沟渠 ditch		○	●	●	●			●		
湖泊 ^[37] Lake				○	●		●			○
森林 ^[38] Forest	●	●	●	○	○	●	●		○	○
耕地 ^[34] Farmland		●	●	●	○	○	○		○	○
园地 ^[34] Orchard	●	●	●	●		●	○		○	○

●洪水调节功能较强;○洪水调节功能较弱;空白——基本无此功能。表中的“●○”符号为各类GI用地洪水调节功能的定性判断,实际测度时需根据研究区土地利用详细数据和实地勘察进行进一步分级或打分

2.2 生态系统测度法

生态系统测度法是利用生态系统服务评估工具进行评价,通常为反应洪水调节量的测度,即根据研究区用地类型和环境特征,利用生态系统服务评估工具的水文模块直接计算研究区洪水调节量,包括蓄水量、截留量、蒸散量等,适用于测度服务供应总量。其中蓄水量可根据水体最高水位与平均水位的高差和水域面积计算^[36],也可参考已有研究中各省区蓄水水体的单位面积调蓄量统计数据^[37];植被截留量和蒸散量可通过文献中植被类型截留率和蒸散率乘以该类植被覆盖面积计算^[38]。常用的工具有 InVEST、ARIES 等(表2)。InVEST (Integrated Valuation of Environmental Services and Tradeoffs),即“生态系统服务功能与权衡交易综合评价模型”,InVEST 的产水量模块主要针对水源涵养服务^[39],可测度降雨事件中栅格内绿色基础设施用地的下渗量和蒸散量,但模型简化了水文循环过程,未反映出地表径流、地下径流与植被截留过程。ARIES 模型 (Artificial Intelligence For Ecosystem Services)是由美国佛蒙特大学开发的生态系统服务功能评估模型。通过人工智能和语义建模,ARIES 集合相关算法和空间数据等信息,可对多种生态系统服务功能(碳储量和碳汇、美学价值、雨洪管理、水土保持、淡水供给、渔业、休闲、养分调控等)进行评估和量化^[40]。该方法大多针对不同用地类型或生态系统类型的洪水调节服务进行评估,由于生态系统评估工具的综合性较强,涉及多个服务模块,因此针对性较弱,可在数据有限的情况下进行粗略的评估。

2.3 洪水调蓄模型法

洪水调蓄模型法主要应用于洪水调节服务供应空间和供应水平的模拟和测度,方法原理为基于土地覆盖详细数据,利用洪水调蓄模型,采用反应洪水调节服务的一个或多个指标评价研究区的服务供应水平,通常以栅格单元或土地覆盖类型为评价单元。操作方法包括:①收集流域环境与降雨模式等环境参数,以及详细的土地覆盖数据;②根据研究区尺度和地理特征选取适用的模型工具;③导入环境参数与土地覆盖数据,进行模拟实验,输出洪水调节量或反应洪水调节效应^①的指标^[41];④根据输出结果进行供应水平分级和空间表征^[42-43]。该方法一方面可通过计算截留量、调蓄量、下渗量等测度洪水调节的水量^[44],另一方面还可通过调节效应指标对服务供应水平进行评估,如地表径流与峰值流量较小、土壤持水能力较高、集水区出口的排水量较大的区域具有越高的洪水调节能力^[45-46]。Nedkov 和 Burkhard 以地表径流系数等指标将研究区划分等级,

在空间上用不同颜色的面域表示,将等级划分结果与土地覆盖类型叠合,统计各类土地服务该类型在各个指标等级中的面积占比,以判断每种土地覆盖类型的供应能力^[26],也有研究通过地下水对地表径流的贡献(比例)反应洪水调节服务供应水平^[43]。调节量指标反应绿色基础设施的供应总量,但计算方法复杂且准确度较低,调节效应指标反应洪水调节服务的实际供应量,大多为实测数据,虽便于计算和模拟实验,但只能评估某一时间点(实测数据时间)的供应量,且需区分流域或集水区绿色基础设施和灰色基础设施的调节效应,否则结果仍缺乏准确性(表3)。

表 2 常用的生态系统服务评估工具
Table 2 Assessment tools of ecosystem service

工具 Tool	机构 Institutions	尺度 Scale	主要功能 Main functions	数据需求 Data requirement	特征 Feature
InVEST	美国斯坦福大学等联合开发	区域尺度	包括水土保持、水体净化等评估。	数据需求较高,包括土地利用、DEM、土壤质地和长期气象数据,以及蒸散系数、根系深度、流速系数等参数	主要模拟下渗和蒸散,未反映出地表径流、地下径流与植被截留过程
ARIES	美国佛蒙特大学	区域尺度	雨洪管理、水土保持、淡水供给等评估。	年降水量、平均年实际蒸散量、平均年径流量、植被类型、树木覆盖度、坡度、不透水面覆盖、高速路、农地、铁路、河漫滩范围等	考虑重要的生态和社会因子,评估精度较高

表 3 洪水调节服务供应测度指标
Table 3 Indicators of measurement for flood regulationsupply

类型 Category	指标 Indicators	指标内涵 Content of indicator	数据需求 Data requirement	测度对象 Measure object	适用方法 Applicable method
调节量 Regulation amount	截留量	植被对降雨量的吸收作用	植被截留率、植被类型、植被覆盖面积	林地、园地等有植被覆盖的用地	生态系统测度法、环境模型法
	调蓄量	水体容纳洪水的能力	水体最高蓄水位、平均水位、水体面积	湖泊、水库、湿地等水体	土地利用测度法、生态系统测度法、环境模型法
	下渗量	土壤对降雨或洪水的吸收能力	土壤渗透率、地下水补给率	所有 GI 用地类型	土地利用测度法、生态系统测度法
调节效应 Regulation effect	径流系数	反映某区域洪水调节的总体效果	实测径流深度,降水深度	GI 和人工调控设施	土地利用测度法、环境模型法
	峰值流量	某区域用地对洪峰的削减作用	实测峰值流量	GI 和人工调控设施	土地利用测度法、环境模型法
	土壤持水能力	某区域土壤的下渗能力	土壤类型及其特征参数	所有 GI 用地类型	土地利用测度法、环境模型法
	集水区出口的排水量	集水区洪水调节服务总体供应能力	实测集水区出口排水量	GI 和人工调控设施	环境模型法

洪水调蓄模型法常用的工具有 SWAT、STREAM、KINEROS2 等(表4)。SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型是美国农业部农业研究局(USDA-ARS)开发的流域尺度的分布式模型,用于模拟地表水、地下水的水质和水量,预测土地管理措施对不同土壤类型、土地利用方式和管理条件的大中尺度复杂流域的水文、泥沙和农业化学物质的影响。水文过程模型作为 SWAT 模型的一个重要子模型,主要包括降雪融雪过程、地表产流过程、蒸散发过程、地下基流过程等^[47]。STREAM (Spatial Tools for River basins and Environment and Analysis of Management options)模型是以蓄满产量为概念结构的降水径流模型,采用单元网格的计算方法,可以设计日、月、年等不同时间尺度的模拟,主要针对较大尺度流域的水文模拟,用于评估气候变化、土地利用变化对水资源的影响,模拟误差一般在 20%以内,模拟精度与采用的数据源、流域特征、计算单元网格大小等因素相关^[48]。KINEROS2(KinematicRunoffandErosionModel,Version2)是一个基于次降雨的分布式过程模型,用

Smith–Panlange 模型和动力波理论模拟截留、地表径流和侵蚀过程^[40]。AGWA (Automated Geospatial Watershed Assessment) Tool 是 ArcGIS 中的界面,用于支持 KINEROS2、SWAT9 模型等的数据库组织、模型参数化、集成和可视化等,可在多个时空尺度上进行水文模拟和流域评估,包括径流、侵蚀和沉积物产量等^[49]。

表 4 三种洪水调蓄模型工具对比
Table 4 Comparison of three flood storage models

工具 Tool	尺度 Scale	主要功能 Main functions	数据需求 Data requirement	特征 Feature
SWAT ^[47]	区域尺度	模拟地表水、地下水的水质和水量	气象数据(气温、降雨、太阳辐射、风速、相对湿度)、径流数据、流域数字高程模型、土地利用、土壤类型	适用于大尺度长时间的水文过程模拟
STREAM ^[48]	区域尺度	评估气候变化、土地利用变化对水环境的影响及水文过程模拟。	降雨模式与降雨量、平均温度、土地利用、土地覆盖、植被信息、土壤质地、地形坡度、流向等流域水文气象和下垫面信息,流域特征信息需网格离散化处理	采用单元网格的计算方法,可以设计日、月、年等不同时间尺度的模拟
KINEROS ^[40]	区域尺度	截留、地表径流和侵蚀过程模拟。	数字高程模型(DEM),土地覆盖数据,土壤数据,水文和气候数据,并应采用符合 AGWA GIS 标准的特定格式	次降雨分布模型,适用与短时间的天文过程模拟

3 GI 洪水调节服务需求测度方法

绿色基础设施洪水调节服务的需求测度方法包括风险评估法、洪水淹没模型法和经济损失法,测度单元多为土地利用单元和栅格单元,测度对象为需求主体,即城市或乡村社区。

3.1 风险评估法

风险评估是洪水调节服务需求测度最常用的方法,也是洪灾规划最常用的决策依据,是指基于风险三要素对洪灾发生的风险进行评估,用洪灾风险的高低衡量洪水调节服务需求的程度,即:洪灾风险=洪灾强度×承灾体暴露程度×脆弱性^[50]。洪灾强度可以用洪灾发生的频率来表示(如 20 年一遇洪水强度指标为 1/20,即 0.05);承灾体是指被洪灾覆盖的人类活动区域,暴露程度与淹没面积和淹没深度等相关^[51];承灾体脆弱性代表了被洪灾覆盖区域的人类社会面对灾害的易损易伤程度,通过土地利用、人口密度和经济数据等表示^[52]。基本操作步骤为:①收集研究区洪灾历史数据,统计历史最高洪水危险及洪灾发生的频率,并通过水文模型提取 10 年、20 年、50 年一遇等洪水水位线下的淹没区域面积、淹没深度和淹没时间等;②分析受灾区域的脆弱性,主要方法有基于研究区土地利用详细数据(土地功能性质、建筑质量、人口密度、公服设施等)构建指标体系进行评估和分级,或通过历史灾情数据粗略判断,亦或通过实地调查灾损率和灾损曲线等;③通过上述洪灾风险计算公式计算每种重现期下的洪灾风险,并通过栅格计算居民财产、房屋建筑损失等将风险评估结果空间化,作为洪灾规划和空间规划的依据。风险评估法较全面地评估了洪灾造成的损失程度,但强调受灾区域的土地利用和社会经济因素,没有纳入对 GI 洪水调节过程和作用的考虑,只能反应洪水调节服务需求主体的空间分布或需求程度,无法明确回答需求主体的需求水平,即需要调节多少洪水量。

3.2 洪水淹没模型法

洪水淹没模型法应用对象为洪水调节服务的需求主体(城市或社区),主要用于评估洪水灾害的危险性(洪灾强度×承灾体暴露),方法原理是利用洪水淹没模型对不同重现期洪水淹没情况进行模拟,以获取淹没面积、淹没深度和淹没时间,直接计算需要调节或排出多少水量,对洪水危险性进行快速预测并为制定洪水调节策略提供依据^[53]。该方法与风险评估法第一步操作大体相同,但重点在计算洪水调节服务需要调节的水量,以及根据土地利用、绿色基础设施状态等识别洪水调节的优先区域和主要调节空间等。常用的洪水淹没模型有 MIKE 系列模型、Flood Area 模型等。

MIKE 系列模型由丹麦水利研究所开发,可以较真实准确地反应研究区的洪水演进过程,由于其界面友好、功能全面,便于简单快速精确地进行模拟实验,广泛应用在国内城市洪涝灾害危险性评估中,适用于城市尺度和社区尺度等小尺度的研究,需要的数据包括设计暴雨量、下渗率、地形数据(高程)、河网信息(长度、水面宽度等)、河流来流和出流条件等^[54-55]。Flood Area 模型是由德国 Geomer 公司开发的以模块形式与 ArcGIS 集成的二维非恒定流水动力模型,以栅格为单元计算每个栅格与周围 8 个栅格之间的洪水流量和汇流过程,并分为漫顶、溃口和暴雨三种情景,模拟实验需要的基础数据包括降雨期间逐日及过程降水量、逐时降水量、流域 DEM 数据、土地利用栅格数据、土壤类型栅格数据、灾情调查资料等^[56-57]。Flood Area 可对洪灾淹没进行分情景模拟,但三类情景同时存在时的复杂淹没情景还需进一步完善。

3.3 经济损失法

经济损失法是通过洪灾经济损失(直接损失与间接损失)的历史统计数据与预测分析,识别洪水调节服务需求主体、空间分布和需求程度。洪灾经济损失统计与预测方法大多为空间信息格网法,即基于 ArcGIS 等空间工具建立空间展布式社会经济数据库,收集研究区社会经济信息、地形地貌、土地利用和居民点分布等数据,再利用遥感影像提取淹没范围,基于淹没范围和经济数据库统计洪灾造成直接损失和间接损失,包括死伤人口、损毁房屋、个人财物、公共设施、受淹农作物、死伤牲畜等。由于流域内需求主体可能不止一个,且下游需求之间存在相关性,因此有研究将流域洪灾经济损失与上游区域面积的比率作为服务需求水平的测度指标之一,将需求与潜在的服务供应面积关联起来,也就是说损失相同时,上游地区面积越大,该流域需求则越小^[41]。经济损失是对洪灾需求程度的一类客观表现,该方法可从经济价值方面反映洪灾造成的危害程度,且无需进行水文模拟实验,可用于洪水调节服务需求水平的初步估计和预判,但经济损失只能反映需求程度,无法直接测度需求水平,且由于分析数据皆为历史统计数据,该方法无法对气候变化环境下的潜在需求进行测度。

4 GI 洪水调节服务供需分析框架

基于对供需匹配状态的认知探索供需服务流动方式,可以为提升供需效度(服务供应/服务需求)的绿色基础设施规划提供依据。通过分析供需数量均衡和空间匹配关系,可以分为四种情景(图 4):①数量均衡且空间匹配为服务供需平衡状态,需进一步探索变化环境下的服务供需动态平衡;②空间匹配而数量不均衡时(主要为供不应需)需要优化洪水调节服务的供应主体特征,并调整需求主体的分布等特征,提升供应水平同时降低需求水平,实现供需匹配;③数量均衡而空间不匹配时需要通过服务流动达到服务供需的流动平衡状态;④空间不匹配且数量不均衡时需同时调整供需水平和促进服务流动。

4.1 GI 洪水调节服务供需的数量均衡

数量均衡分析是 GI 优化管理的基础。供需数量均衡分析方法有两类:第一类为等级均衡,即基于供需水平测度分级,将需求等级分值转换为负值后与服务供应等级分值进行叠加,以叠加后数值的正负与大小判断供需数量均衡关系^[26]。该方法虽然能粗略判断洪水调节服务供需的程度关系,但无法准确地反应供需数量的大小关系,适用于较难量化的服务均衡分析。第二类为数值均衡,即直接用服务测度指标的数值进行均衡分析,适用于供给服务、部分调节服务等可量化的服务均衡分析。GI 洪水调节服务的核心功能是“调节”,核心对象是洪水,因此采用数值均衡方法分析供需关系更加准确有效。

服务供需数量均衡时应首先确定服务供需的内部构成及其数量比例关系,即服务的供应阈值和需求阈值,再分析供需之间的数量比例关系。服务供应阈值是指在保持自身稳定的前提下 GI 能提供的最大服务量,包括实际供应量和一部分潜在供应量,取决于 GI 功能特征和状态。GI 洪水调节服务的需求阈值是指在所有需要调节的洪水中可通过 GI 调节的最大洪水量,城市尺度上可能存在总洪水水量无法全部由 GI 调节,因此,还需探索 GI 洪水调节量和灰色基础设施洪水调节量之间的最佳组合方式,以达到最有效地洪水调节作用。确定洪水调节服务的供应阈值和需求阈值后,供需数量均衡才具有可持续性。

供需数量均衡可采用供需比(即服务效率)反应服务供需之间数量均衡状态,供需比为1时为供需平衡,也可根据研究区情况设置供需平衡浮动区间。供需比分为当前供需比和总量供需比。当前供需比即实际供应与实际需求的关系^[32],可以反应GI在受灾时发挥的实际调节作用;总量供需比即总量供应与总量需求的比例关系,能为GI优化和生态系统服务管理提供决策依据。当前供需比是对服务供需现状认知,而总量供需比反应了潜在供应量与潜在需求量,是GI洪水调节服务数量均衡分析的关键指标。

4.2 GI洪水调节服务供需的空间匹配

洪水调节服务普遍存在供需空间分异,因此空间匹配是供需分析的核心内容,也是绿色基础设施规划分析和决策的重要依据。GI洪水调节服务供需空间匹配研究始于供需空间识别与表征,再逐渐发展为对供需空间之间关联的深入研究。供需空间识别与表征是反应生态系统服务供需空间格局和时空演变的重要手段。将服务供需测度的结果按照测度单元和测度水平分级用不同颜色,形成了供需空间识别与表征的常用方法,形成洪水调节服务供需空间分布图^[43]。洪水调节服务供需空间分布图内容包括:服务供应主体(各类绿色基础设施)和需求主体(受洪水威胁的城市、社区、乡村居民点、农田等)的位置和规模;洪水调节服务供应水平和需求水平空间分布;洪水调节服务供需关系的空间特征,即供需盈余、赤字或平衡区域的空间分布特征^[58]。供需空间之间的关联分为原位关联、全方位关联和方向性关联三种关系。原位关联是指服务供应与需求空间在同一位置(如自给自足的食物供应);全方位关联是指服务产生于一个位置但其受益区域可辐射周边或全球,通常为长期存在的服务需求且没有偏好和指向性(如碳循环等支持服务);方向性关联是指服务供应与需求空间不在同一位置且二者在空间上具有特定的方向性(如水供应、洪水调节等)^[2-3]。洪水调节服务的供需空间关联主要是方向性关联和原位关联,其中方向性关联最为常见,如上游区域的水调节作用可减少下游区域的洪水形成几率,下游区域可为上游区域提供洪水调蓄空间,原位关联较少,如调节空间中少量的乡村居民点或城市区域内具有调节功能的绿色空间等。

4.3 GI洪水调节供需服务流动

基于GI洪水调节服务的供需空间特征及其关联,对供需服务流动机制的探索逐渐萌生,主要从流动空间与流动方向识别、流动方式与流动过程、服务流量以及服务流动模拟等展开研究^[59-60]。通常为基于生态系统服务供需空间分布,通过对生态系统服务功能特征和作用方式,分析生态系统服务的实现方式^[61],识别服务流动空间和流动方向并绘制服务流动示意图^[62]。也有对服务流动进行量化研究,但研究成果较少。对服务流动机制的模拟研究也有一些进展,如ARIES模型下的“服务路径属性网络”(SPANs, Service Path Attribution Networks)。对于洪水调节服务,服务流动有两种方式:一种方式是构建GI以提升需求空间的洪水调节服务水平,或将需求主体向服务供应水平较高的空间转移;另一种方式是将超过调节服务水平的洪水水量,通过河流沟渠或者人工设施转移到其他供应(或需求)空间上。两种服务流动方式中,第一种方式可有效降低调节总量需求,而第二种方式过程中总量需求不变,其中一部分需求转移到其他空间,如许多防洪设施(防洪堤等)是将风险和洪水调节需求转移到下游,增加了下游需求主体的风险。洪水调节服务的流量应定义为洪水调节的水量,服务流动模拟可利用模拟工具对服务流动过程和效果进行直观的展示,较为准确地模拟洪水调节的流量和路径等,但以上研究目前仍处于概念阶段,还未取得进一步成果^[63]。

5 结论与思考

通过Web Of Science和CNKI上进行相关关键词检索,包括“洪水调节服务(flood regulation service)”、“水文调节服务(water regulation service)”、“生态系统服务评估(ecosystem service assessment)”、“生态系统服务量化与制图(qualification and mapping of ES)”等,分析了国内外涉及洪水调节生态系统服务测度或评估方面的文献约60余篇。从研究内容上看,专门研究洪水调节服务供需测度的文献国内外都很少,国内几乎没有,主要的成果为Stürck和Nedkova的研究,其余大多数研究为生态系统服务综合功能测度和价值评估,将洪水调节服务作为其中一类评估内容,基于洪水调节服务测度的服务流动机制和服务供需平衡研究较少。研究

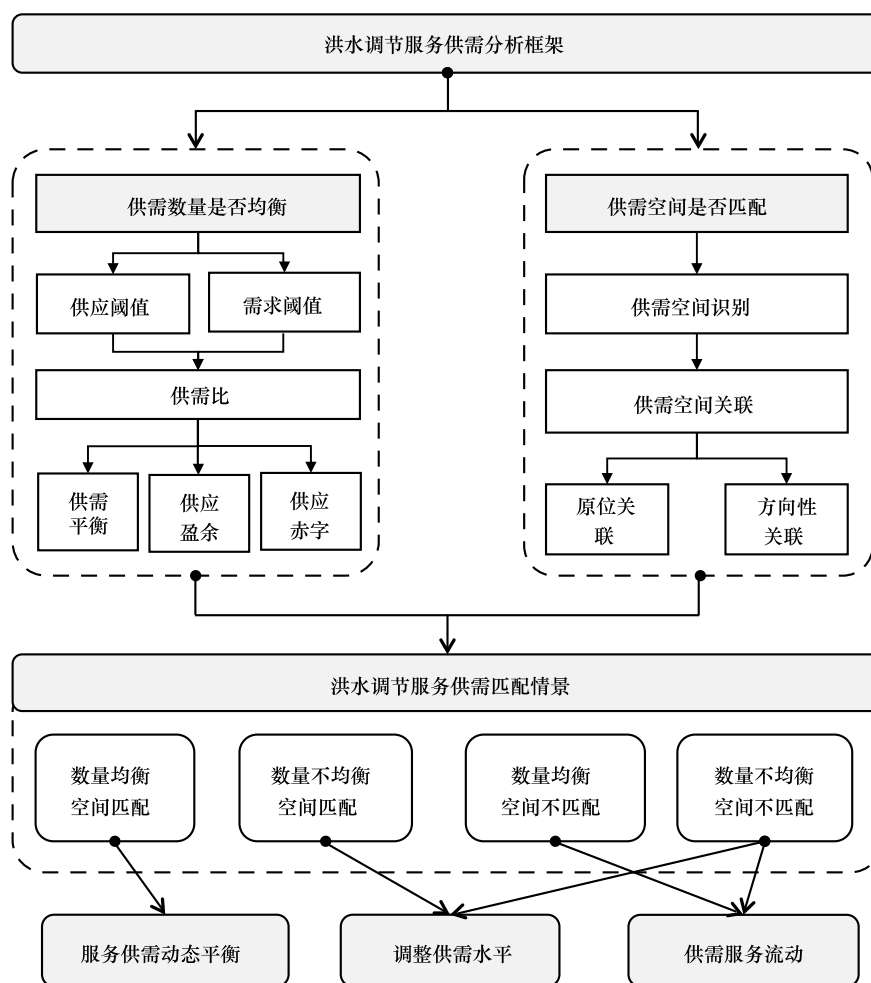


图4 洪水调节服务供需分析框架

Fig.4 Framework of analysis for flood regulation supply and demand

类型上,绝大多数为方法研究,即基于理论探讨构建测度模型,并选取研究区进行模型应用,而对模型的验证研究和模拟结果的实证性研究较少。从研究对象上看,国内多以某一类生态系统(如湿地、湖泊、森林或城市生态系统)为研究对象,国外已经对各类绿色空间的土地覆盖进行了洪水调节服务的评估研究。从研究空间尺度上看,中小尺度流域单元的研究较多,国外有少量国家、洲际的研究。从时间尺度上看,多以短时间内的降雨模式和环境特征情景为研究基础,有少量研究加入了气候变化趋势的因素。以上研究虽取得了一定的成果,但笔者认为仍存在问题并提出相关思考。

(1)GI洪水调节服务供需测度对象不聚焦,应将洪水量调节作为GI洪水调节服务测度的重点。目前的研究中洪水调节服务的供应测度过于关注GI的生物物理调节过程(截留和下渗),忽略了绿色基础设施也具备为快捷有效的调蓄和排水功能。需求水平测度重心为社会和经济要素,忽略了对需要调节的洪水量本身的测度。供应测度应以GI调节水量(调蓄、下渗)为核心内容,强调GI的洪水调节服务供应总量;需求测度应以人类聚居区需要调节的水量为主要测度内容,可通过淹没数据和模拟计算得出。供应可理解为流域内可浸区的持水量,需求可理解为流域内不可浸区需排出的水量。

(2)对GI洪水调节服务供需水平的动态变化分析较少。应将气候变化环境、规划发展等自然与社会因素纳入对洪水调节服务的供需测度框架中,关注气候变化背景下的洪水调节服务供需量和供需关系的动态演变。GI洪水调节供应量应包括绿色基础设施现状服务量和规划优化后提升(或减少)的服务量,需求测度应包括现状需求和城市规模变化情景下的潜在需求。

(3) 供需数量均衡分析时供需服务测度量纲不统一。应将供需水平测度量纲统一为洪水调节量,可采用供应率 and 需求率表征供需效能。目前研究中供应指标多为调蓄水量或调蓄水率,需求指标多为灾害损失的经济价值,再将二者统一转换为等级分值进行供需数量均衡分析,只能粗略判断服务供需程度,无法准确回答何时何地可以调节和需要调节多少水量。要回答这个问题还需结合生态系统状态和 GI 特征分析服务供应阈值,即生态系统稳定前提下 GI 能提供的最大服务量;结合城市自然环境、土地利用特征和社会经济条件分析洪水调节需求量,探索绿色基础设施与灰色基础设施调节水量的最优组合方式。

(4) 服务流动机制研究虽然取得了一些成果,但由于供需空间交错叠加、不同服务之间存在相互作用,再叠加上社会经济等因素,服务流动机制的研究存还处于概念与初探阶段。未来的研究应基于洪水调节服务供需关系的深入理解,进一步展开洪水调节服务流动空间和方向、流动方式和过程、服务流量和路径、服务流动机制模拟等相关研究,从而建立洪水调节服务供需主体之间的反馈网络,为 GI 规划的决策和管理提供科学依据。

注释 1 调节效应指标:径流率、径流峰值等无法直接计算调节水量的指标,但可反应洪水调节服务产生的效果。

参考文献 (References):

- [1] Andréassian V. Waters and forests: from historical controversy to scientific debate. *Journal of Hydrology*, 2004, 291(1/2): 1-27.
- [2] Costanza R. Ecosystem services: multiple classification systems are needed. *Biological Conservation*, 2008, 141(2): 350-352.
- [3] Fisher B, Turner R K, Morling P. Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological Economics*, 2009, 68(3): 643-653.
- [4] 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.
- [5] Geijzenborffer I R, Martín-López B, Roche P K. Improving the identification of mismatches in ecosystem services assessments. *Ecological Indicators*, 2015, 52: 320-331.
- [6] 颜文涛, 黄欣, 邹锦. 融合生态系统服务的城乡土地利用规划: 概念框架与实施途径. *风景园林*, 2017, (1): 45-51.
- [7] 傅伯杰, 张立伟. 土地利用变化与生态系统服务: 概念、方法与进展. *地理科学进展*, 2014, 33(4): 441-446.
- [8] Vallecillo S, Polce C, Barbosa A, Perpiña Castillo C, Vandecasteele I, Rusch G M, Maes J. Spatial alternatives for Green Infrastructure planning across the EU: an ecosystem service perspective. *Landscape and Urban Planning*, 2018, 174: 41-54.
- [9] de Groot R S, Alkemade R, Braat L, Hein L, Willemen L. Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. *Ecological Complexity*, 2010, 7(3): 260-272.
- [10] Baró F, Palomo I, Zulian G, Vizcaino P, Haase D, Gómez-Baggethun E. Mapping ecosystem service capacity, flow and demand for landscape and urban planning: a case study in the Barcelona metropolitan region. *Land Use Policy*, 2016, 57: 405-417.
- [11] Pártl A, Vačkář D, Loučková B, Lorencová E K. A spatial analysis of integrated risk: vulnerability of ecosystem services provisioning to different hazards in the Czech Republic. *Natural Hazards*, 2017, 89(3): 1185-1204.
- [12] Castro A J, Vaughn C C, Julian J P, García-Llorente M. Social demand for ecosystem services and implications for watershed management. *Journal of the American Water Resources Association*, 2016, 52(1): 209-221.
- [13] Lähinen K, Guan Y C, Li N, Toppinen A. Biodiversity and ecosystem services in supply chain management in the global forest industry. *Ecosystem Services*, 2016, 21: 130-140.
- [14] Costanza R, D'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Ecological Economics*, 1998, 25(1): 3-15.
- [15] Burkhard B, Kroll F, Nedkov S, Müller F. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets. *Ecological Indicators*, 2012, 21: 17-29.
- [16] Ritzema H, Kirkpatrick H, Stibinger J, Heinhuis H, Belting H, Schrijver R, Diemont H. Water management supporting the delivery of ecosystem services for grassland, heath and moorland. *Sustainability*, 2016, 8(5): 440-440.
- [17] Benedict M A, McMahon E T. *Green Infrastructure: Linking Landscapes and Communities*. Washington DC: Island Press, 2006.
- [18] 张伟, 杰克·艾亨, 刘晓明. 生态系统服务评估在美国城市绿色基础设施建设中的应用进展评述. *风景园林*, 2017, (2): 101-108.
- [19] 邹锦, 颜文涛, 曹静娜, 叶林. 绿色基础设施实施的规划学途径——基于与传统规划技术体系融合的方法. *中国园林*, 2014, 30(9): 92-95.
- [20] Crossman N D, Burkhard B, Nedkov S, Willemen L L J, Petz K, Palomo I, Drakou E G, Martín-López B, McPhearson T, Boyanova K,

- Alkemade R, Egoh B, Dunbar M B, Maes J. A blueprint for mapping and modelling ecosystem services. *Ecosystem Services*, 2013, 4: 4-14.
- [21] Villamagna A M, Angermeier P L, Bennett E M. Capacity, pressure, demand, and flow: a conceptual framework for analyzing ecosystem service provision and delivery. *Ecological Complexity*, 2013, 15: 114-121.
- [22] Groot R S, Wilson M A, Boumans R M J. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*, 2002, 41(3): 393-408.
- [23] Tallis H, Polasky S. Mapping and valuing ecosystem services as an approach for conservation and natural-resource management. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2009, 1162(1): 265-283.
- [24] 吕一河, 胡健, 孙飞翔, 张立伟. 水源涵养与水文调节: 和而不同的陆地生态系统水文服务. *生态学报*, 2015, 35(15): 5191-5196.
- [25] Nedkov S, Burkhard B. Flood regulating ecosystem services—Mapping supply and demand, in the Etropole municipality, Bulgaria. *Ecological Indicators*, 2012, 21: 67-79.
- [26] Haines-Young R, Potschin M, Kienast F. Indicators of ecosystem service potential at European scales: mapping marginal changes and trade-offs. *Ecological Indicators*, 2012, 21: 39-53.
- [27] 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.
- [28] Martínez-Harms M J, Balvanera P. Methods for mapping ecosystem service supply: a review. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, 2012, 8(1/2): 17-25.
- [29] 严岩, 朱捷缘, 吴钢, 詹云军. 生态系统服务需求、供给和消费研究进展. *生态学报*, 2017, 37(8): 2489-2496.
- [30] 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.
- [31] Baró F, Haase D, Gómez-Baggethun E, Frantzeskaki N. Mismatches between ecosystem services supply and demand in urban areas: a quantitative assessment in five European cities. *Ecological Indicators*, 2015, 55: 146-158.
- [32] 白杨, 王敏, 李晖, 黄沈发, Alatalo J M. 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.
- [33] Serna-Chavez H M, Schulp C J E, van Bodegom P M, Bouten W, Verburg P H, Davidson M D. A quantitative framework for assessing spatial flows of ecosystem services. *Ecological Indicators*, 2014, 39: 24-33.
- [34] 罗静茹, 张德顺, 刘鸣, 哈拉尔德·策普. 城市生态系统服务的量化评估与制图——以德国盖尔森基辛市沙克尔协会地区为例. *风景园林*, 2016, (5): 41-49.
- [35] Sohel M S I, Mukul S A, Burkhard B. Landscape's capacities to supply ecosystem services in Bangladesh: a mapping assessment for Lawachara National Park. *Ecosystem Services*, 2015, 12: 128-135.
- [36] 吴炳方, 黄进良, 沈良标. 湿地的防洪功能分析评价——以东洞庭湖为例. *地理研究*, 2000, 19(2): 189-193.
- [37] 饶恩明, 肖赓, 欧阳志云. 中国湖库洪水调蓄功能评价. *自然资源学报*, 2014, 29(8): 1356-1365.
- [38] 曹云, 欧阳志云, 郑华, 黄志刚, 邢芳芳. 森林生态系统的水文调节功能及生态学机制研究进展. *生态环境*, 2006, 15(6): 1360-1365.
- [39] 唐尧, 祝炜平, 张慧, 宋瑜. InVEST 模型原理及其应用研究进展. *生态科学*, 2015, 34(3): 204-208.
- [40] 黄从红, 杨军, 张文娟. 生态系统服务功能评估模型研究进展. *生态学杂志*, 2013, 32(12): 3360-3367.
- [41] 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.
- [42] Burkhard B, Kroll F, Müller F, Windhorst W. Landscapes' capacities to provide ecosystem services - a concept for land-cover based assessments. *Landscape Online*, 2009, 15(1): 1-22.
- [43] Egoh B, Reyers B, Rouget M, Richardson D M, Le Maitre D C, van Jaarsveld A S. Mapping ecosystem services for planning and management. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2008, 127(1/2): 135-140.
- [44] 王尧, 徐佩, 傅斌, 王威, 王海雯. 森林生态系统水源涵养功能评估模型研究进展. *生态经济*, 2018, 34(2): 158-164, 169-169.
- [45] 李佩武, 李贵才, 陈莉, 袁雪竹, 徐凤. 深圳市植被径流调节及其生态效益分析. *自然资源学报*, 2009, 24(7): 1223-1233.
- [46] Posthumus H, Rouquette J R, Morris J, Gowing D J G, Hess T M. A framework for the assessment of ecosystem goods and services; a case study on lowland floodplains in England. *Ecological Economics*, 2010, 69(7): 1510-1523.
- [47] 林炳青, 陈莹, 陈兴伟. SWAT 模型水文过程参数区域差异研究. *自然资源学报*, 2013, 28(11): 1988-1999.
- [48] 李恒鹏, 王旭强, 杨桂山, 金洋. 基于单元格网的 STREAM 分布式水文模型及其应用——以太湖上游西苕溪流域为例. *长江流域资源与环境*, 2007, 16(6): 715-715.
- [49] Goodrich D C, Guertin D P, Burns I S, Nearing M A, Stone J J, Wei H Y, Heilman P, Hernandez M, Spaeth K, Pierson F, Paige G B, Miller S N, Kepner W G, Ruyle G, McClaran M P, Weltz M, Leonard J. AGWA: the automated geospatial watershed assessment tool to inform rangeland management. *Rangelands*, 2011, 33(4): 41-47.
- [50] Kron W. Flood risk = hazard · values · vulnerability. *Water International*, 2005, 30(1): 58-68.

- [51] Patro S, Chatterjee C, Mohanty S, Singh R, Raghuwansi N S. Flood inundation modeling using MIKE FLOOD and remote sensing data. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2009, 37(1): 107-118.
- [52] 方建, 李梦婕, 王静爱, 史培军. 全球暴雨洪水灾害风险评估与制图. *自然灾害学报*, 2015, 24(1): 1-8.
- [53] 郭凤清, 屈寒飞, 曾辉, 丛沛桐, 耿欣. 基于 MIKE21 的湛江蓄滞洪区洪水危险性快速预测. *自然灾害学报*, 2013, 22(3): 144-152.
- [54] 初祁, 彭定志, 徐宗学, 孟德娟, 甄婷婷, 姜其贵. 基于 MIKE 11 和 MIKE 21 的城市暴雨洪涝灾害风险分析. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2014, 50(5): 446-451.
- [55] 麻蓉, 白涛, 黄强, 杨旺旺. MIKE 21 模型及其在城市内涝模拟中的应用. *自然灾害学报*, 2017, 26(4): 172-179.
- [56] 谢五三, 田红, 卢燕宇. 基于 FloodArea 模型的大通河流域暴雨洪涝灾害风险评估. *暴雨灾害*, 2015, 34(4): 384-387.
- [57] 张明达, 李蒙, 戴丛蕊, 黄玮. 基于 FloodArea 模型的云南山洪淹没模拟研究. *灾害学*, 2016, 31(1): 78-82.
- [58] Stürck J, Schulp C J E, Verburg P H. Spatio-temporal dynamics of regulating ecosystem services in Europe – The role of past and future land use change. *Applied Geography*, 2015, 63: 121-135.
- [59] Palomo I, Martín-López B, Potschin M, Haines-Young R, Montes C. National Parks, buffer zones and surrounding lands: mapping ecosystem service flows. *Ecosystem Services*, 2013, 4: 104-116.
- [60] Turner W R, Brandon K, Brooks T M, Gascon C, Gibbs H K, Lawrence K S, Mittermeier R A, Selig E R. Global biodiversity conservation and the alleviation of poverty. *BioScience*, 2012, 62(1): 85-92.
- [61] Nedkov S, Zhiyanski M, Dimitrov S, Borisova B, Popov A, Ihtimanski I, Yaneva R, Nikolov P, Bratanova-Doncheva S. Mapping and assessment of urban ecosystem condition and services using integrated index of spatial structure. *On Ecosystem*, 2017, 2: e14499.
- [62] Maass J M, Balvanera P, Castillo A, Daily G C, Mooney H A, Ehrlich P, Quesada M, Miranda A, Jaramillo V J, García-Oliva F, Martínez-Yrizar A, Cotler H, López-Blanco J, Pérez-Jiménez A, Búrquez A, Tinoco C, Ceballos G, Barraza L, Ayala R, Sarukhán J. Ecosystem services of tropical dry forests: Insights from long-term ecological and social research on the Pacific Coast of Mexico. *Ecology and Society*, 2005, 10(1): 17.
- [63] 肖玉, 谢高地, 鲁春霞, 徐洁. 基于供需关系的生态系统服务空间流动研究进展. *生态学报*, 2016, 36(10): 3096-3102.