

基于生态系统服务空间流的洪涝调节服务需求制图与生态空间优先级识别

Mapping of Flood Regulation Service Demand and Identifying of Priority Settings of Ecological Spaces in Rapidly Urbanized Area Based on Ecosystem Service Spatial Flow

申佳可
彭震伟
王云才*

SHEN Jiake
PENG Zhenwei
WANG Yuncai

摘要: 中国快速城市化地区面临严重洪涝风险和洪涝调节服务供需空间的分离。为识别在满足洪涝调节服务需求方面重要性高的生态空间以纳入保护的优先级, 提出了一种在生态空间中绘制洪涝调节服务需求的新技术: 基于生态系统服务空间流, 利用流量、流边界、流方向、分配原则及其修正因子4个多维指标, 表征将服务需求从建设空间向生态空间分配与投射过程的关键环节。结果显示: 面积大、人口密度高的建设空间存在高需求流量; 借助水文空间流, 服务需求由建设空间被分配至同一集水区内存具有洪涝调节能力的生态空间中; 被投射为高服务需求的生态空间大多规模较大或紧邻高需求的建成空间。通过控制流量、扩展流区域、增加流方向和提升生态空间服务供应能力, 能有效调控投射于生态空间内的洪涝调节服务高需求。

关键词: 风景园林; 生态系统服务空间流; 洪涝调节服务; 需求制图; 生态空间; 多维指标集; 分配模型

文章编号: 1000-6664(2022)02-0020-06

DOI: 10.19775/j.cla.2022.02.0020

中图分类号: TU 986

文献标志码: A

收稿日期: 2021-09-24

修回日期: 2021-11-30

基金项目: 国家重点研发计划课题“乡村生态景观数字化应用技术研究”(编号2019YFD1100405)资助

Abstract: China's rapidly urbanized areas face serious flood risks and the separation of supply and demand spaces of the flood regulation service. To identify the priority settings for restoration and protection of ecological spaces with high importance in meeting flood regulation service demand, this paper proposed a novel technique for mapping flood regulation service demand in ecological spaces: based on the ecosystem service spatial flow, the key links of the service demand allocation and protection process from construction spaces to ecological spaces were represented by using for multidimensional indicators: flow quantity, flow boundary, flow direction, and allocation principle and the correction factors. The results showed that the construction spaces with large area and high population density have high demand flow quantity. With the hydrological spatial flow, service demand was allocated from construction spaces to ecological spaces with flood regulation capacity within the same catchment. The ecological spaces projected as high service demand areas were large in scale or close to the construction spaces with high demand. By controlling flow quantity, expanding flow area, increasing flow direction, and improving service supply capacity of ecological spaces, high demand for flood regulation service projected in ecological spaces can be effectively regulated.

Keywords: landscape architecture; ecosystem service spatial flow; flood regulation service; demand mapping; ecological space; multidimensional indicator cluster; allocation model

1 研究背景

1.1 城市洪涝使生态空间的洪涝调节优先级识别成为必要

城市化和工业化进程扰乱了原有自然水文循环过程, 为快速城市化地区带来了严重的城市洪涝灾害^[1]。当前, 洪涝问题已成为困扰中国城市生态安全的燃眉之急。充分了解来自城市建设空间的洪涝调节需求给生态空间带来的压力与要求, 有助于识别快速城市化地区现有生态空间的保护优先级, 明确调节洪涝风险的关键区, 从而

有效增强城市面对洪涝风险的韧性。

1.2 洪涝调节服务供需空间分离阻碍洪涝调节优先级空间识别

在人口密集的建成区内部, 蓝绿基础设施的服务供给能力与位于城市周边的生态空间相比微乎其微^[2]。这导致集中产生人类洪涝调节需求的建成区, 与分布于建成区外围提供大部分洪涝调节服务的生态空间存在空间的错配。现有对于生态系统服务需求的评价与制图, 往往关注于需求在人口密集的建成区内的分布。但是仅在建成区

内对生态系统服务需求进行制图, 无法直接生成对城市郊区的生态空间提供相应服务总量与布局的参考^[3]。这也为识别快速城市化地区生态空间中应对人类需求的优先级与关键区带来了技术困境。

1.3 生态系统服务空间流是向生态空间分配服务需求的关键

“生态系统服务交付链”理论认为, 完整的生态系统服务传输与交付过程发生于服务供给区、服务需求区及连接2个区域的生态系统服务

* 通信作者(Author for correspondence) E-mail: wyc1967@tongji.edu.cn

空间流(以下简称“空间流”)当中^[4]。正是依赖于空间流,商品和服务才得以从供给区运送到与之不相邻的需求区^[5]。但目前仍缺乏对空间流具象与可视化的研究^[6],现有大多数对空间流的制图和机制的表述通常停留在概念层面^[7]。

为了将来自建设空间的洪涝调节服务需求反映在相应生态空间中,从而了解哪些生态空间因为被投射了较高服务需求而承受更大的生态压力并需要承担更多生态责任,并将这些生态空间识别为应对人类洪涝调节服务需求的优先空间进行保护与修复,本文提出一种对洪涝调节服务需求进行制图的新技术:基于空间流多维指标集,解构并量化空间流传输洪涝调节服务的过程,从而将来自建设空间的服务需求以空间显式方式分配并投射至生态空间中,揭示现有生态空间体系在总量和分布两方面对洪涝调节服务需求的响应,并识别其中的高需求区为满足洪涝调节服务需求的优先空间,以对其进行重点调控与保护。

2 研究逻辑与方法框架

本文将快速城市化地区的建设空间识别为服务需求直接产生并输出的源(图1-模块A);将发挥主导生态功能的生态空间识别为需求传输终点和通过提供服务使所有需求被满足的汇(图1-模块B)。基于生态系统服务交付链理论(图1-模块C),假设生态系统服务需求同样可以依赖于空间流由产生需求的源(建设空间)向需求被满足的汇(生态空间)的运动,被分配并投射至周边相应生态空间中,并通过生态空间类型及生态空间内需求的总量和分布,反映人类社会的服务需求对现有生态空间体系的要求水平,并以此表征生态空间在防洪调蓄方面的优先级:投射的服务需求水平越高,生态空间的洪涝调节责任和面临的洪涝风险越大,其保护与修复的优先级也应越高。

为了具象化描述并量化评价服务需求借助空间流从模块A到模块B的机制与过程,本文构建了用以描述和表征空间流特征的多维指标集(图1-模块D):流量、流边界、流方向和分配原则与修正因子。流量是描述空间流最基础的特征指标;一些依赖空间流的服务需求的满足存在空间限制^[3],只有在特定区域内,来自受益区的服务需求才有可能被分配至供给区;方向性是空间流的重要特征,描述了空间流从某个服务受益区

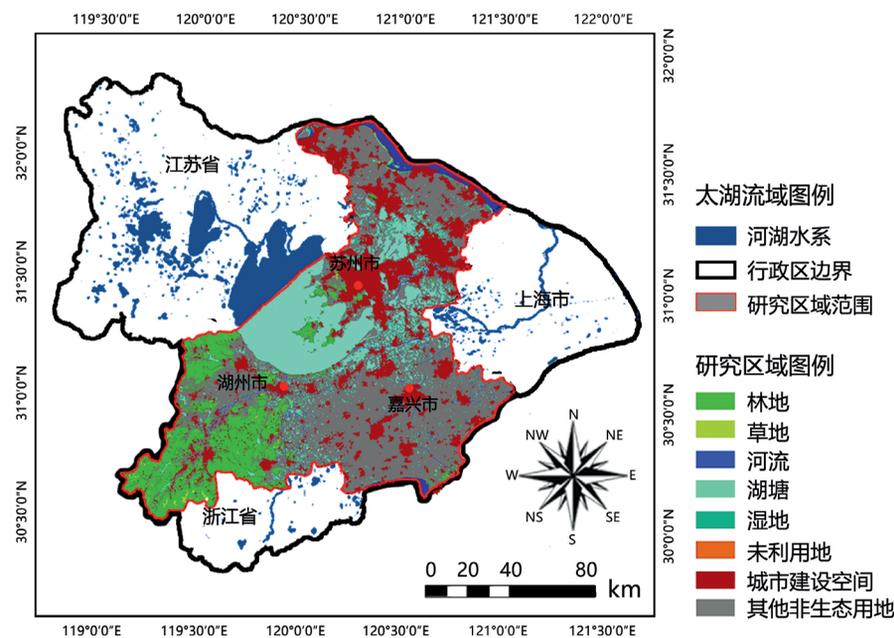
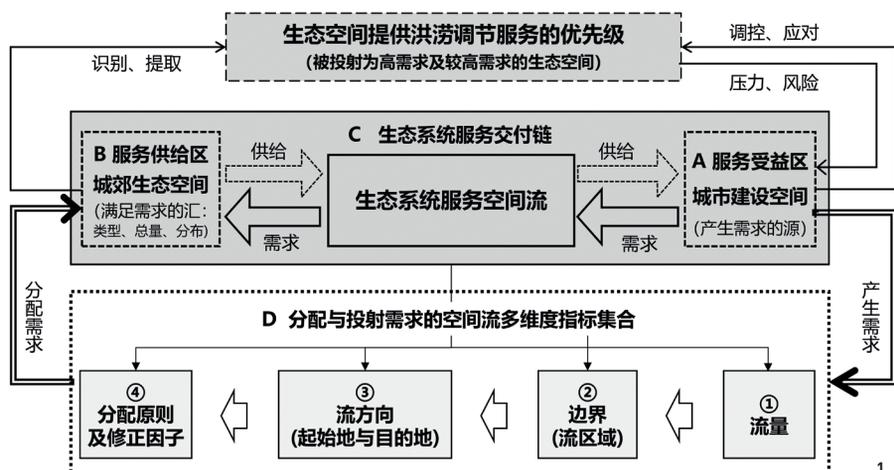


图1 研究逻辑与方法框架
图2 研究区域区位地图及土地利用类型划分图

出发向特定的某个或多个服务供给区分配需求的过程;服务需求的总量在分配过程中表现出特定模式,如按面积比例分配或沿距离衰减^[9],且在此过程中受到相关因素的综合影响。

本文认为,由以上4个多维指标形成的指标集对空间流传输与交付生态系统服务的过程有重要影响,也表征了空间流在不同维度上的特征和关键信息。为了实现借助空间流将服务需求从建设空间向生态空间进行空间分配和投射的复杂过程,需要将对空间流特征指标的量化分解为具体实施过程中的4个环节分步进行,并分别用每个环节表征一个维度上的特征指标,从而生成对服务需求进行分配和投射的技术路径。

3 研究区域与数据来源

3.1 研究区域概况

研究区域苏州、嘉兴、湖州环太湖东岸分布(图2),研究范围包括3座城市的中心城区、城市边缘区和乡村地区,总面积18 221km²,常住人口1 831万。作为紧邻大上海都市圈的快速城市化区域,3座城市在人口、经济活动、生态完整性、交通基础设施等方面联系密切,形成了一个巨大的共城市化地区^[9],即苏嘉湖地区。在2000—2015年的15年间,该地区建设用地总计增加2 174.8km²^[10]。

伴随高强度土地开发和不断提高了的城镇化水平,苏嘉湖地区建成区内的生态空间大量丧失;

而现有生态空间大多位于建成区外部的城市边缘区及乡村地区,服务供给区与受益区的空间分离现象明显。此外,苏嘉湖地区所处太湖流域洪涝灾害频发,20世纪曾发生10余次重大洪水灾害,洪水面积超过 $39\ 103\text{km}^2$ ^[11]。尽管近年来太湖流域水系已得到改善,但生态空间的丧失和不透水地面的增加,以及其所处流域洪涝灾害和极端天气频发的特征,使苏嘉湖地区面临愈发严重的洪涝风险。选择这一区域对洪涝调节服务需求进行分配与制图,有助于明确快速城市化背景下人类社会对洪涝调节服务的需求在现有生态空间体系中的分布特征,这关系到该地区人民最核心的安全与保障需求,也对于高效管理发展中国家大城市周边共城市化地区的生态资源,并有效应对洪涝灾害风险有重要意义。

3.2 数据来源与处理

利用6个数据集(表1)计算苏嘉湖地区建设空间的洪涝调节服务需求,并向生态空间分配服务需求。所有空间数据均来自2015年,且采用ArcGIS 10.3按照 $15\text{m} \times 15\text{m}$ 的精确度处理。参考由自然资源部组织修订的国家标准《土地利用现状分类》(GB/T 21010—2017),并结合苏嘉湖地区土地利用特点和遥感信息的可判性,识别研究区域建成区内的建设空间,包括城镇用地、交用地和工业用地3类。农村居民点用地由于数量多、规模大,且分布于广阔的腹地,暂未在本文中考虑。识别研究区域的生态空间,将其细分为林地、草地、湿地、河流、湖塘和未利用地6类。将服务需求的计算结果在建设空间斑块水平上汇总,将服务需求的分配结果在生态空间斑块水平上汇总。

4 洪涝调节服务需求制图与生态空间防洪优先级识别

4.1 流量:建设空间洪涝调节服务需求评价与空间分析

本文用建设空间产生的洪涝调节服务需求总量代表空间流传输的流量。以建设空间暴露于洪水风险之下的脆弱性作为对服务需求的代理,构建洪水脆弱性指数(Flood Vulnerability Index, FVI):脆弱性越高,洪水带来的潜在损害越大,该区域对服务的需求越高。将建设空间面积、高程、坡度、人口密度、城市水面率、排水设施密度和年平均降雨量作为评价该区域洪水脆弱性指

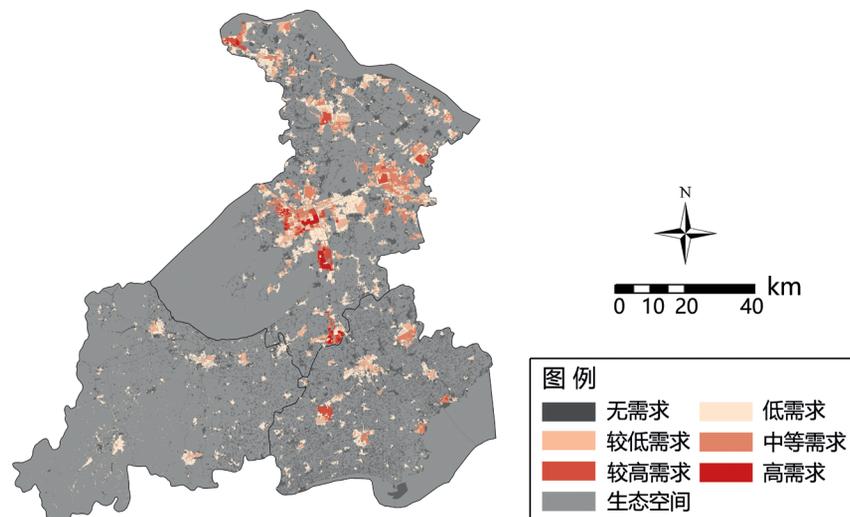


图3 苏嘉湖地区建设空间洪涝调节服务需求等级的空间制图

数的综合代替指标^[12-13]。具体计算公式如下:

$$FVI_j = S_j \times (1 - ELE_j) \times SLO_j \times POP_j \times AP_m / (WP_j \times SI_j) \quad (1)$$

式中, j 为建设空间; FVI 为建设空间的洪水脆弱性指数; S 为建设空间面积, m^2 ; ELE 为高程(将 ELE 值归一化至 $0 \sim 1$); SLO 为坡度; POP 为建设空间内人口数; WP 为建设空间水面率(绿地和水体占建设空间面积比例); SI 为建设空间内排水设施的密度; AP 为年平均降雨量, mm ; m 为城市 m 。

利用自然断点法,对建设空间服务需求的评价结果进行需求等级划分。不存在洪涝调节服务需求的建设空间被赋值为0,其他建设空间的服务需求被分为5个等级,并赋值1~5:1-低需求,2-较低需求,3-中等需求,4-较高需求,5-高需求。将等级值转入ArcGIS,绘制洪涝调节服务需求在建设空间中的分布图。由图3可知,在苏嘉湖地区,洪涝调节服务的高需求(5-

高需求、4-较高需求)空间以点状形式分散分布于各建成区内,出现于靠近太湖的苏州主城区、长江南岸和苏州东部的城郊地区,以及嘉兴的桐乡市等地。

4.2 边界:识别作为洪涝调节服务空间流边界的集水区

空间流区域范围的识别强调并代表了生态系统服务的特征,即该服务能够通过一定范围内进行的生物物理过程(如水文及大气过程)或物种迁移和扩散过程来支撑。基于专家经验和知识、笔者共识及已有研究结论^[5, 14],本文认为对于洪涝调节服务这一依赖于水文空间流的服务来说,服务供给区必须与服务受益区在物理上联系起来才能实现服务的交付或投射^[15]。已有很多研究以集水区作为自然地理单元,对与水相关的生态系统服务进行统计和分析^[7, 16],因为一个集水区内的河道、蓄水空间、天然洪泛区和水库等生态空间对依赖水文过程的服务交付具有重

表1 用于对洪涝调节服务需求进行评估与分配的6个数据集

数据类型	尺度/格式	数据来源
数字高程模型	苏嘉湖地区/栅格	北京数字空间科技有限公司, http://www.dview.com.cn/ 地理国情监测云平台, http://www.dsac.cn/
Landsat 8遥感影像图	苏嘉湖地区/栅格	USGS, http://glovis.usgs.gov/
土地利用图	苏嘉湖地区/栅格	北京数字空间科技有限公司, http://www.dview.com.cn/
电子地图(城市绿地、水体、排水设施)	苏嘉湖地区/要素类(面、点)	地理国情监测云平台, http://www.dsac.cn/
中国人口空间分布公里网格数据集	中国, 栅格	北京大学城市与环境学院地理数据平台, http://geodata.pku.edu.cn
统计数据	苏嘉湖地区/电子表格	《湖州市统计年鉴(2016年)》, http://tjj.huzhou.gov.cn/ 《嘉兴市水资源公报(2015年)》, http://www.jiaxing.gov.cn/ 《苏州市环境状况公报(2015年)》, http://sthjj.suzhou.gov.cn/

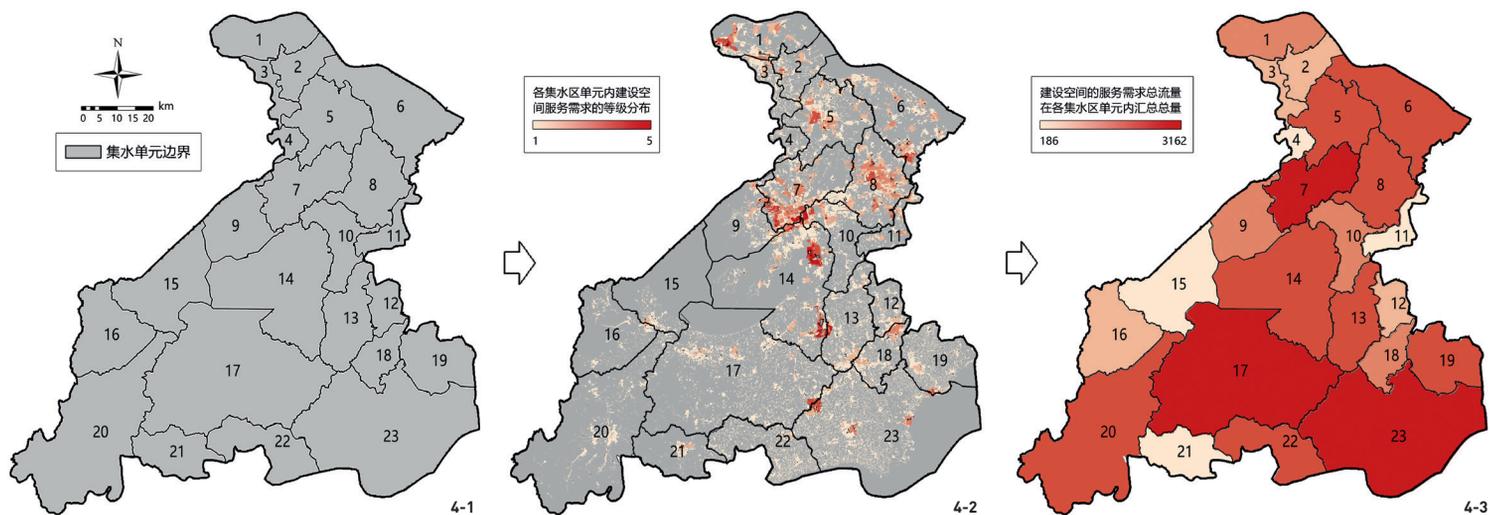


图4 作为流域区域的23个集水区边界识别

要影响。因此，本文将传递洪涝调节服务需求的空间流区域识别为发出服务需求的建设空间所在的集水区范围。

基于从公共数据库下载的数字高程模型，利用ArcGIS工具箱中的“水文分析工具”提取研究区流域，人工校正后形成23个集水区(图4-1)。各集水区边界为其中的空间流将服务需求从建设空间分配至相应生态空间提供了限定范围。将来自建设空间的洪涝调节服务需求等级值在各集水区内存累，得到各集水区需要向其中的生态空间分配与投射的服务需求总流量(图4-2、4-3)。可以看出，覆盖了湖州和嘉兴大部分市域范围且面积较大的17和23号集水区，以及覆盖了苏州市主城区的7号集水区具有最高的服务需求总流量。

4.3 方向：确定洪涝调节服务流的目的地

流方向由流的起始地、目的地和方向效应等因素共同决定。其中，方向效应取决于服务供给区的空间类型，以及空间流是否遵循距离最近原则^[6]。本文认为，洪涝调节服务的传输过程既不表现为明显的随距离衰减，也未表明具有地理最近距离的供给区与受益区之间的服务交付水平最高，因此假设该服务需求在传输过程中不受距离影响。并且认为，在一个集水区内存，服务需求的满足依赖于服务从具有洪涝调节能力的空间到对洪水脆弱区的传递^[17]，即将建设空间产生的服务需求分配至具有提供该服务能力的生态空间中使之消解。此外，洪涝调节服务的供给区与受益区间需存在高差，以支持水文空间流的存在。因

此本文认为，除研究区域内未利用地(植被覆盖率<5%)外，与产生服务需求的建设空间处于同一集水区，且与该建设空间存在高差的其余5类生态空间，因其具有通过疏导洪峰水量、拦泥蓄水、减少径流等方式提供洪涝调节服务的能力，可作为在该集水区内分配服务需求的目的空间。

在此基础上，面积更大的生态空间被认为具有容纳更多洪水的能力和倾向。将各集水区内汇总的服务需求总流量，按照生态空间在某一集水区内面积占该集水区内生态空间总面积的比例，向同一集水区内生态空间进行均质分配(图5-1)，分配模型如下：

$$BFRD_i = \sum_{j \in N_k} FVI_j \times \frac{A_i}{\sum_{i \in M_k} A_i} \quad (2)$$

式中， i 为生态空间 i ； $BFRD_i$ 为按面积比例均质分配至生态空间 i 的基本洪涝调节服务需求； k 为集水单元 k ； N_k 为属于集水单元 k 内的建设空间 j 构成的集合； M_k 为属于集水单元 k 内的生态空间 i 构成的集合； FVI_j 为建设空间 j 的洪水脆弱性指数(即服务需求)； A_i 为生态空间 i 的面积， m^2 。在各生态空间斑块水平上对投射至同一生态空间内的服务需求进行汇总，如图5-2所示。与图3中处理结果相似，利用自然断点法将服务需求按面积比例分配的结果划分为5个等级。由图5-2可知，按面积比例向生态空间分配服务需求的结果与生态空间的面积高度相关。

4.4 分配原则及修正因子：生态空间中洪涝调节服务需求的分配与投射制图

除生态空间面积这一服务需求的分配原则中

首要的基本影响因素外，其他因素也会对洪涝调节服务在各集水区范围内的分配过程产生影响，使服务需求并非按面积比例均质分配。因此，本文在基本分配原则的基础上，加入了其他修正因子以代表多种可能的影响因素，从而以更接近空间流真实机制的方式分配服务需求(表2)。考虑到不同因素对服务需求的传输与分配过程所遵循的基本原则的影响程度有所不同，因此为各影响因素设置了权重，来表示在多种因素的综合作用中，某一因素对于服务分配模式产生的影响所占的相对比例。通过对20位研究领域囊括风景园林生态规划、城市生态规划、区域水资源与水环境规划、生态系统服务空间性及权衡、生态系统服务效能的本地专家进行问卷调查，获得了基于专家经验得到的这一影响程度(权重值)的平均值。

高程高于建设空间(或位于其上游)的生态空间容纳洪水的能力决定了下游建设空间受洪水损害的程度^[17]，而高程低于建设空间(或位于其下游)的生态空间的存在则有助于通过地表径流的排水缓解城市洪涝。此外，不同类型生态空间表现出不同的蓄水能力。水体作为水的天然容器，通过将过量的水储存起来并缓慢释放，从而将水在时间和空间上进行再分配，避免和减少洪水灾害，因此认为水体生态系统具有比陆地生态系统更强的蓄水和洪水调节能力。综上，在考虑生态空间面积对分配原则影响的基础上，再将蓄水能力及生态空间与建设空间的高差作为分配机制中的修正因子。具体的修正分配模型如下：

$$FRD_i = BFRD_i \times (C_i \times 0.4 + ELE_i \times 0.35 + P_i \times 0.25) \quad (3)$$

式中, i 为生态空间; FRD_i 为修正后最终分配至生态空间的洪涝调节服务需求; $BFRD_i$ 为按面积比例均质分配至生态空间的基本洪涝调节服务需求; C 为生态空间相对规模对应赋值; ELE 为生态空间与建设空间高程差对应赋值; P 为生态空间蓄水能力对应赋值; 0.40、0.35、0.25分别为生态空间相对规模、高程、蓄水能力等修正因子在服务需求分配中的权重值。

利用自然断点法将反映在生态空间中的洪涝调节服务需求划分为5个等级, 以此作为生态空间在防洪与调蓄方面的优先级: 需求等级越高, 生态空间在提供洪涝调节服务方面的角色就越重要, 就越应被优先识别为发挥防洪调蓄功能的关键空间。从图6可知, 洪涝调节服务的高需求(5-高需求、4-较高需求)反映在研究区域内的长江、阳澄湖北部圩区、太湖及太湖东南沿岸一系列湿地等水体空间中。研究区域南部湖州市内的大片林地及内部草地也反映出高需求水平。上述地区应被识别为进行生态保护与修复以保证并加强其调蓄能力的重点区域, 是保障周边建设空间免受洪涝灾害的优先空间。

5 基于生态系统服务流的多维指标空间调控策略

生态空间防洪重要性区域识别的目的在于对其进行高效且有效的调控与管理。通过关注代表各环节的多维指标, 能将投射于生态空间的高服务需求的监测、控制与管理落实在相应环节。

5.1 控制流量

当需求不可避免时, 人们可以在产生高需求的建设空间内投资技术和工程, 通过控制流量的方式, 从源头减少服务需求总量。传统的硬质工程防洪措施始终是最受欢迎的选择, 因为这对于减少在洪水风险中的暴露和增加韧性十分重要^[16]。对于研究区域来说, 对流量的制图结果(图3)显示, 洪涝调节服务的高需求空间以小规模的点状形式分布于建成区内, 尤其是苏州和嘉兴主城区的局部区域。因为上述地区的建设空间集中、规模较大、地势较低, 且人口密集度高, 从而导致面对洪水风险时脆弱性高。基于这一结果识别的关键区域, 利用场地尺度的工程技术手段, 可以提高居民的防洪需求在当地被满足的程度, 从而缓解

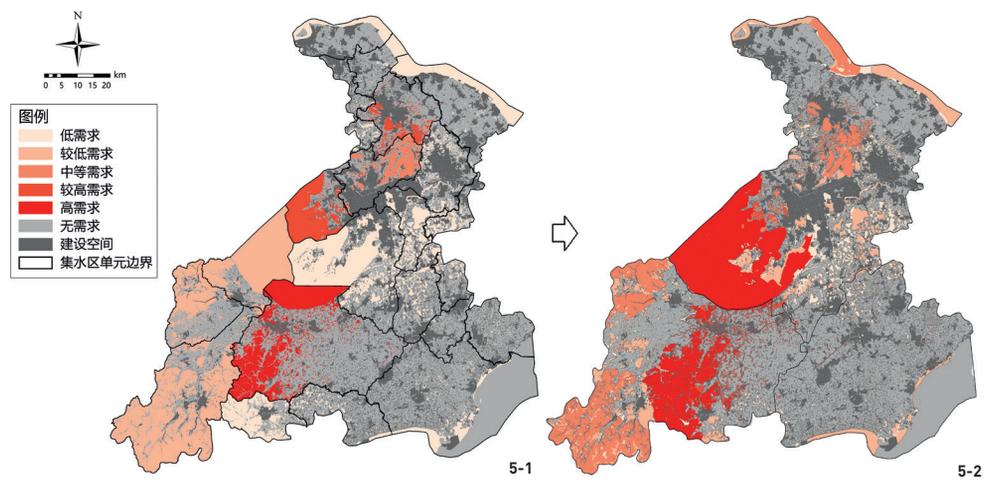


图5 各集水区内存服务需求的目的地生态空间识别

人类社会给生态系统带来的压力。

5.2 扩展流域区域范围

研究区域内被投射为高服务需求的水体(如太湖、阳澄湖)和其周边的建设空间之间存在大量空间上彼此分离的小型湖泊, 作为空间流在上述空间之间传输服务需求的连接空间^[16]。虽然同样是天然的储水容器, 但由于自身规模和布局的限制, 由图6可知, 这些位于太湖东岸及阳澄湖外围的零散小型湖泊在分散洪水方面的优先级很低。为提升这些作为连接空间的小型湖泊承载空间流并传输服务的能力, 从而在空间流从苏州主城区的建设空间向太湖及阳澄湖传输洪涝调节服务需求的过程中容纳洪水、消解部分需求, 以降低到达太湖和阳澄湖服务需求的水平, 可通过增加上述湖泊之间的结构性连通空间, 扩展空间流流动的区域范围, 以增加用于分配既定服务需求总量和分散生态压力的生态空间数量和规模, 从而有效调控现有大型水体内存的高服务需求。

5.3 增加流方向

图6中投射于研究区域南部大片山林地的高服务需求, 是由于这片林地处于高程较高的山地, 其蓄水能力对于下游的建设空间意义重大。其内部分配的较高服务需求反映了空间流遵循

特定方向(下游建设空间-上游山林地)传递服务需求的综合结果。当从建设空间出发的空间流仅能在特定且有限的方向上分配服务需求时, 作为需求汇的生态空间必定会呈现较高的服务需求水平。在现有界限限定的范围内, 通过在研究区域各个集水区内部上游位置选择耕地进行适当退耕还林、还湖, 增加对洪水进行再分配的生态空间; 或是以研究区域内植被覆盖率极低的未利用地为修复对象, 通过提高植被覆盖率, 使其具备提供洪涝调节服务以满足需求的能力, 从而增加各个集水区内存具有蓄水与储水能力的生态空间作为洪涝调节服务需求的汇。

5.4 提升既定距离内生态空间的生态系统服务供应能力

生态空间自身的面积、形状、植被覆盖、吸引物等相关影响因子决定其服务供给的水平和满足服务的能力^[19]。通过参考分配原则及其修正因子的影响作用, 可通过生态修复定向提升优先级的生态空间服务供给能力, 以应对其承受的洪涝调节压力。对于研究区域北部投射为高服务需求的长江来说, 增加其河岸植被的覆盖面积或改善沿岸植被结构的复杂度, 有助于提升河段整体的蓄水能力; 对于研究区域南部及西部3片保护

表2 生态系统服务距离分配机制及其修正因子的赋值与权重

生态系统服务	基本分配机制	修正因子	赋值	权重
洪涝调节服务	不受距离显著影响, 在既定范围内按面积比例均质分配	生态空间相对规模	较大: 10; 中等: 5; 较小: 1	0.40
		与建设空间高程差	>0: 10; <0: 5; =0: 1	0.35
		生态空间蓄水能力	陆地生态系统: 5 水体生态系统: 10	0.25

注: 表中“生态空间相对规模”的分类经自然断点法处理各生态空间的面积值并分3类得到; 各个修正因子的赋值及权重均由20位专家评分得到。

与修复优先级高的山林地来说,通过进行生态用地类型的转换,如将其内部的未利用地和草地转化为林地,或是将陆地生态系统转化为蓄水能力更强的水体生态系统,如湿地,从而增强关键位置上生态空间提供洪涝调节服务的能力,以避免生态空间内洪涝调节服务供需失衡导致的洪涝风险。

6 结语

在洪水频发的快速城市化地区,了解人类社会洪涝调节需求的总量与分布在生态空间中的反映,对于识别发挥防洪调蓄关键作用区,优先保护承受较高生态风险的现有生态空间,并针对性地提高其洪涝调节服务供给水平至关重要。但快速城市化地区的建设空间与提供服务的生态空间是分离和脱节的。这种情况下,只有依赖生态系统服务空间流的支持才能实现生态系统服务的交付及需求的满足。通过考虑生态系统服务的空间流机制和多维指标集,本文提出了向生态空间分配并绘制来自建设空间的洪涝调节服务需求的新技术,包括以下4个核心环节:产生流量-生成边界-确认方向-在一定的距离上分配并投射服务。通过这一方法,可以在生态空间中展示哪些区域因为承载了更多来自人类社会的洪涝调节需求、期望和压力而需要受到重点关注并优先进行修复,并将其纳入生态空间保护的优先级中。本文还指出,通过以下4种策略——控制流量、扩展流区域、增加流方向、提高既定距离上生态空间提供服务的能力,能够有效调控出现于建设空间及生态空间内的高服务需求,缓解快速城市化地区面临的洪涝风险。本文为土地管理者提供了基于快速城市化地区人类需求,管理并保护自然资源与生态空间的空间指导信息。

注:文中图片均由申佳可绘制。

参考文献:

- [1] 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[J].中国园林,2018,34(10):45-49.
- [2] 王忙忙,王云才.生态智慧引导下的城市公园绿地韧性测度体系构建[J].中国园林,2020,36(6):23-27.
- [3] Schröter M, Remme R P, Hein L. How and where to map supply and demand of ecosystem services for policy-relevant outcomes?[J]. *Ecological Indicators*, 2012, 23: 220-221.

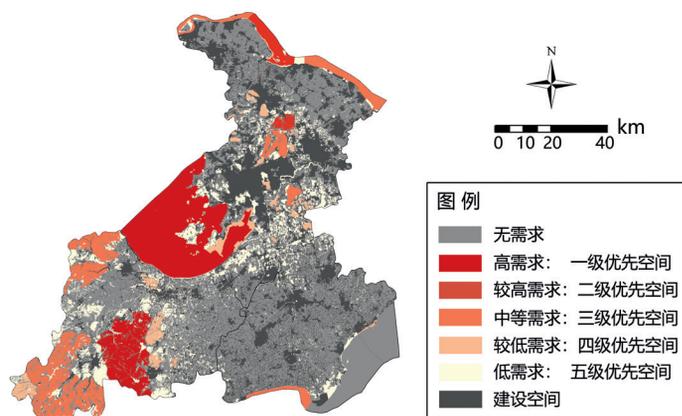


图6 生态空间中分配的洪涝调节服务需求及其优先级的空间制图

- [4] Vig L E, Depellegrin D, Pereira P, et al. Mapping the ecosystem service delivery chain: Capacity, flow, and demand pertaining to aesthetic experiences in mountain landscapes[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 574: 422-436.
- [5] Serna-chavez H M, Schulp C J E, Bodegom P M, et al. A quantitative framework for assessing spatial flows of ecosystem services[J]. *Ecological Indicators*, 2014, 39: 24-33.
- [6] Shi Y, Shi D, Zhou L, et al. Identification of ecosystem services supply and demand areas and simulation of ecosystem service flows in Shanghai[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 115: 1-14.
- [7] 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.
- [8] Tardieu L. The need for integrated spatial assessments in ecosystem service mapping[J]. *Review of Agricultural, Food and Environmental Studies*, 2017, 98: 173-200.
- [9] 申佳可,王云才.基于多重生态系统服务能力指数的生态空间优先级识别[J].中国园林,2021,37(6):99-104.
- [10] 国家统计局.中国统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,1978-2015.
- [11] 虞孝感,吴泰来,姜加虎,等.关于1999年太湖流域洪水灾情、成因及流域整治的若干认识和建议[J].湖泊科学,2000,12(1):1-5.
- [12] Cortinovis C, Geneletti D. A performance-based planning approach integrating supply and demand of urban ecosystem services[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2020, 201: 103842.
- [13] Shen J, Du S, Huang Q, et al. Mapping the city-scale supply and demand of ecosystem flood regulation services: A case study in Shanghai[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 106: 105544.
- [14] Bagstad K J, Johnson G W, Voigt B, et al. Spatial dynamics of ecosystem service flows: A comprehensive approach to quantifying actual services[J]. *Ecosystem Services*, 2013, 4: 117-125.
- [15] 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.
- [16] Goldenberg R, Kalantari Z, Cvetkovic V, et al. Distinction, quantification and mapping of potential and realized supply-demand of flow-dependent ecosystem services[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 593-594: 599-609.
- [17] Stürck J, Poortinga A, Verburg P H. Mapping ecosystem services: The supply and demand of flood regulation services in Europe[J]. *Ecological Indicators*, 2014, 38: 198-211.
- [18] Van A N, Vellinga P, Leemans R, et al. Ranking coastal flood protection designs from engineered to nature-based[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 87: 80-90.
- [19] Shen J, Guo X, Wang Y. Identifying and setting the natural spaces priority based on the multi-ecosystem services capacity index[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 125: 107473.

(编辑/马琳)

作者简介:

申佳可

1991年生/女/吉林长春人/博士/同济大学建筑与城市规划学院城乡规划学在站博士后/研究方向为风景园林规划与设计、生态系统服务、绿色基础设施(上海 200092)

彭震伟

1964年生/男/上海人/博士/同济大学党委副书记,教授,博士生导师/全国小城镇规划学术委员会主任/中国城市规划学会常务理事/研究方向为国土空间规划、区域规划、小城镇规划(上海 200092)

王云才

1967年生/男/陕西勉县人/博士/同济大学建筑与城市规划学院景观学系教授,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/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/本刊编委(上海 200092)