DOI: 10.5846/stxb202204301201

蒋飞阳,田健,艾合麦提・那麦提,曾坚.应对暴雨洪涝灾害的平原城市生态水文调节服务供需评估——以天津市为例.生态学报,2023,43(12): 4928-4942.

Jiang F Y, Tian J, Aihemaiti Namaiti, Zeng J.Assessment of the supply-demand relationship of plain urban eco-hydrological regulation service in response to rainstorm-flood disaster: a case study of Tianjin City. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(12):4928-4942.

应对暴雨洪涝灾害的平原城市生态水文调节服务供需 评估

——以天津市为例

蒋飞阳¹,田 健^{1,2,*},艾合麦提·那麦提¹,曾 坚¹

1天津大学建筑学院,天津 300072

2 同济大学建筑与城市规划学院,上海 200092

摘要:生态水文调节服务是生态系统服务的重要组成,能够有效调节地表径流,缓解暴雨洪涝灾害。但由于城市建设扩张、生态 环境退化、极端降雨频发等因素,导致生态水文调节服务出现供需失衡。平原城市中地形水动力较弱及城市发展需求高的特征 更是加剧了这种现象。基于生态系统供需视角,以生态水文调节率表征城市生态水文调节服务的生态供给,以暴雨洪涝风险表 征城市生态水文调节服务的社会需求,构建应对暴雨洪涝灾害的平原城市生态水文调节服务供需研究框架。以典型平原城市 天津市为例,应用 SWAT 模型、随机森林模型和 AreGIS 定量测度城市生态水文调节服务供需水平,划分四种供需空间匹配类 型,识别供需失衡关键区域,并进行五级规划干预等级分区。结果表明:(1)供给能力呈现"东南沿海高,西北近山低"的空间分 布;需求水平表现出"多中心聚集,圈层向外递减"的分布规律。(2)供需空间分布呈现正相关关系,低供-低需在四种供需匹配 类型中占据主导,同时空间聚集性最明显。(3)规划干预分区存在明显的空间差异,优先干预区占比 5.41%,整体与建成区分布 一致,大部分集中在市内六区,其次分布在滨海新区核心区,是未来规划治理的重点。研究结果为城市规划管理从生态水文调 节服务供需视角防控平原城市暴雨洪涝灾害提供科学依据。

关键词: 生态水文调节服务; 暴雨洪涝; 供需评估; 平原城市; 天津市

Assessment of the supply-demand relationship of plain urban eco-hydrological regulation service in response to rainstorm-flood disaster: a case study of Tianjin City

JIANG Feiyang¹, TIAN Jian^{1,2,*}, AIHEMAITI Namaiti¹, ZENG Jian¹

1 School of Architecture, Tianjin University, Tianjin 300072, China

2 School of Architecture, Tongji University, Shanghai 200092, China

Abstract: Eco-hydrological regulation service is an important component of ecosystem services, which can effectively regulate surface runoff and alleviate rainstorm-flood disasters. However, due to the expansion of urban construction, the degradation of the ecological environment, and the frequent occurrence of extreme precipitation, the spatial imbalance between the supply and demand of eco-hydrological regulation services has emerged. This phenomenon was exacerbated by the weak terrain hydrodynamic force and high demand for urban development in plain cities. In this study, from the perspective of the supply and demand of ecosystem services, we used the runoff regulation capacity to characterize the

收稿日期:2022-04-30; 网络出版日期:2023-02-10

基金项目:国家自然科学基金项目(52078330)

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: 693339189@ qq. com

supply level of eco-hydrological regulation services and expressed the demand level of eco-hydrological regulation services by the risk of rainstorm-flood disasters, to construct a research framework on the supply and demand of eco-hydrological regulation services in plain cities. Therefore, we took Tianjin as an example to evaluate the supply and demand level and their spatial distribution characteristics of eco-hydrological regulation services based on the SWAT model, random forest model, and ArcGIS platform, and then we used the matching degree of supply and demand to divide the research unit into four types. Finally, we used the priority index to divide these areas into five planning intervention priorities. The results showed that: (1) the supply capacity exhibited a feature that the distribution was high in the southeast coastal area and low in the northwest mountainous area. The distribution of demand levels presented a multicenter aggregation and gradually decreases from the center to the outside. (2) There was a positive correlation between supply and demand spatial distributions. Low supply-low demand dominated four types of supply and demand matching, which had the most obviously spatial aggregation. (3) There were obviously spatial variations in planning intervention zones. The priority intervention area was consistent with the urban built-up area distribution, accounting for 5.41% of all the planning intervention zones. Such areas were mainly concentrated in the central city, followed by the core area of Tianjin Binhai New Area, which was the focus of future planning and governance. The results provided a scientific basis for urban planning management to prevent and control rainstorm-flood disasters in plain cities according to the supply-demand relationship of the eco-hydrological regulation service theory.

Key Words: eco-hydrological regulation services; rainstorm-flood; supply-demand assessment; plain city; Tianjin City

2000 年至 2019 年,全球共发生了 3233 起暴雨洪涝灾害事件,占记录灾害事件总数的 44%,是最常见的 灾害类型^[1]。中国郑州"7.20"特大暴雨事件也暴露了现代城市在灾害面前的脆弱性。另外,生态空间大幅 减少、防灾减灾基础设施不足^[2]迫使城市对生态系统水文调节服务的需求愈发强烈。在全球气候变化和城 市扩张加速的背景下,土地覆盖情况和土地利用空间格局发生了明显的变化^[3],城市水文循环和径流超过自 我调节极限^[4],导致城市生态系统中水文调节能力减弱。供给退化,需求增加,城市生态系统水文调节服务 在空间上出现供需失衡。控制雨水径流、减少城市洪涝灾害作为水文调节服务的重点^[5],利用城市生态系统 自身的水文调节服务能力来降低城市应对暴雨洪涝灾害威胁的风险,具有更高的环境效益和更强的恢复 力^[6],也符合国家实现生态可持续发展的环境目标。

生态系统水文调节服务本质为生态演变和水文循环相互影响和耦合协同的效果,从属于生态系统调节服 务^[7]。水文调节服务的量化评估一直是相关研究重点,有研究侧重评估水文调节作用结果,主要方法包括水 量平衡法^[8]、综合蓄水能力法^[9]和多因子回归法^[10],也有研究侧重从自然环境中完整水循环过程出发,模拟 不同空间尺度水文调节的差异效果,其中普遍使用的水文模型是 SWAT(Soil and water assessment tool)^[7]。 SWAT 模型能够模拟完整的生态水文过程,空间化结果更加详实可靠。近年来,也有学者开始从生态系统服 务供需的角度进行水文调节服务供需评估。主要分为两个方面:一是结合水文调节服务和其他生态系统服 务供需的角度进行水文调节服务供需评估。主要分为两个方面:一是结合水文调节服务和其他生态系统服务 进行统一的供需关系评估。利用矩阵法^[11]、价值当量法^[12]、数据空间叠置法^[13]、In VEST 模型法^[14]以及 ARIES 模型法^[15]对区域水量供给^[3]、洪水调节^[16]、地下水补给灌溉^[13]等多种水文服务进行供需分析。二是 分别对水文调节服务供给和需求两方面进行测度,然后分析供需结果的数量均衡程度^[17]或空间匹配程 度^[11]。供给方面的测度延续了上文提到的水文调节服务评估方法。需求方面的测度方法包括指标权重 法^[18]、模型淹没模拟法^[19]、经济损失法^[20]等。应对暴雨洪涝灾害的城市生态水文调节服务的社会需求对应 城市暴雨洪涝灾害风险。洪涝灾害风险评价中常用方法有水动力模型淹没模拟^[19]、多指标评价^[21]、洪涝敏 感性地图(Flood susceptibility mapping,FSM)^[22-25]等。其中,FSM 能够快速准确进行暴雨洪涝灾害敏感性建 模^[22],其内部数学模型包括层次分析法^[26]、频率比法^[27]、逻辑回归法^[28]和随机森林(Random forest, RF)^[29] 等。RF 是研究洪涝灾害与敏感因子之间复杂的、多变量的非线性关系最适用的集成分类算法,在预测灾害敏 感性方面具有优越性^[29]。供需研究是生态系统水文调节服务研究领域的新方向和新热点^[18,30],目前已经有 了长足进展和丰富成果,但仍存在以下不足:已有研究在供需评估方面主要集中在供给分析,同时基于特定社 会需求的生态水文调节服务供需研究也尚匮乏;供需评估量化方法存在模拟过程复杂繁琐、高精度数据难获 取、依赖经验公式等问题;相关研究区域多为地形起伏变化明显的城市,针对平原城市的研究较少,而平原城 市由于地形原因,逢雨必涝,积水严重,在暴雨洪涝灾害中具有更高的危险性^[23,31]。

因此,本文探讨的是生态系统服务功能中水文调节服务供需关系评估在平原城市应用的可能性,选择暴 雨洪涝灾害风险作为城市生态水文调节服务的一种特定社会需求,选择生态水文调节服务中对城市暴雨洪涝 灾害抵抗力和恢复力具有重要意义的径流调节服务作为生态供给,构建应对暴雨洪涝灾害的平原城市生态水 文调节服务供需关系研究框架及评估体系。以天津市为例,进行城市生态水文调节服务供需量化评估,划分 供需匹配类型,识别天津市生态水文调节服务供需失衡关键区域,并进行规划干预分区,为城市规划建设和管 理从生态水文调节服务供需视角应对暴雨洪涝灾害提供参考。

1 研究区概况

天津市地处华北平原东北部,海河流域下游,东临 渤海湾,属于典型的沿海平原城市,位于东经116°43′至 118°04′,北纬 38°34′至 40°15′之间。研究区域为天津 市的整个陆域,面积约为11,912km²。七普数据显示, 天津市 2021 年常住人口为 1386.60 万人,城镇化率为 84.70%。天津市现辖 16个区,其中市内六区包括和 平、红桥、河北、河东、河西和南开六区(图1)。城市化 的快速发展使得天津下垫面条件变化明显,城市不透水 面增加,生态水文调节能力下降。另外,受东南季风暖 湿气流和西风带系统影响,汛期集中在每年6—9月,期 间暴雨事件频发。历史记录中极端暴雨洪涝事件有数 十场。其中1939年天津暴雨持续一个月,淹没全市 80%的面积,受灾人口80万,是最严重的一次暴雨洪涝 灾害事件。2016年"720"暴雨导致了全市 59 处积水, 财产损失严重。因此,有必要从暴雨洪涝灾害特定需求 对天津市生态水文调节服务供需关系进行研究。

2 数据与方法

2.1 数据来源及处理

所用多源数据可分为地形地貌、水文气象、社会经济三类。地形地貌类数据有 DEM、土地利用、土壤类型、岩性和遥感数据;水文气象类数据包括气象站、水文站、河流水系、降雨量和历史积水点数据;社会经济类数据涵盖了道路、夜间灯光、人口密度和全球居民地。其中,将土地利用数据重分类为耕地、森林、灌木林、草地、水体、城镇用地、低密度居住、贫瘠土地以及城市绿地9类^[4],以满足 SWAT 模型需要;基于土壤数据,借助SPAW 软件和 Williams 提出的替换公式计算模拟需要土壤参数^[32];水文数据中选择海河流域中海河闸站2008—2018 年的逐月径流观测数据,用于模拟率定和结果验证;水系数据参照《天津市河道管理条例》提取出全市 19条一级行洪河道。历史积水点数据通过位置转坐标工具矢量化,并剔除位置不准确的数据;利用公式从遥感影像中提取出 NDVI 数据^[25];道路数据中提取出地表改造程度较大的主干道;全球居民点数据中提取城市建筑密度数据。1km×1km 的网格单元是城市尺度生态系统服务相关研究中常用的单元^[33],同时也最接



Fig.1 Overview of the study area

12 期

近积水内涝点在城市街道中的平均影响范围^[34]。研究单元越小,存在的用地冗余信息就越多。研究单元越大,则难以反映城市环境空间下垫面复杂的异质性。因此,将以上数据经处理后,按照平均值法统计进覆盖天津市陆域的1km×1km网格中,坐标系统一为WGS_1984_UTM_Zone_50N,分析验证过程基于ArcMap10.5、Python3.6、SWAT模型以及SWAT-CUP模型。数据具体信息详见表1。

Table 1 Data required for supply-demand assessment of urban eco-hydrological regulation service				
数据名称	类型	精度和范围	来源	
Data name	Data type	Precision and range	Data sources	
数字高程模型 Digital elevation model	栅格	12m×12m	ALOS 的 PALSAR 传感器的 ALOS- 12m 地形数据 (https://www.eorc.jaxa.jp)	
土地利用数据 Land use data	栅格	2020年,30m×30m	中国科学院资源环境科学数据中心(https://www. resdc.cn/)	
土壤数据 Soil data	栅格	1:100 万	HWSD 土壤数据库 V1.2 版本(https://www.fao.org/soils- portal/en/)	
气象站数据 Weather station data	矢量	2008—2018 年逐日	CMADS 数据集 1.2 版本 ^[37-38] (http://www.cmads.org/)	
水文站数据 Hydrologic station data	表格	2008—2018 年逐月径流	中国河流泥沙公报(http://www.mwr.gov.cn/)	
历史积水点 Historical waterlogged point	文本	2021年,427处	《汛期道路交通管理应急预案》及天津公安交管部门	
水系、道路数据 River and road data	矢量	2019年,1:25万	1:25 万全国基础地理数据库(https://www.webmap.cn/)	
遥感影像数据 Remote sensing data	栅格	2018年,30m×30m	地理空间数据云(https://www.gscloud.cn/)	
降雨量数据 Rainfall data	栅格	2009—2017年,1km×1km	国家青藏高原科学数据中心(http://data.tpdc.ac.cn/zh- hans/)	
夜间灯光数据 Nighttime lighting data	栅格	130 m×130 m	珞珈一号数据(http://59.175.109.173:8888/app/login. html)	
人口密度数据 population density data	栅格	100 m×100 m	Worldpop 数据集(https://www.worldpop.org/)	
全球居民地数据 World settlement data	栅格	10 m×10 m	World settlement footprint (https://geoservice.dlr.de/web/ maps/eoc:wsf2019)	
基岩地质图 Bedrock map	矢量	2021年,1:25万	地质云(https://geocloud.cgs.gov.cn/)	

表1 城市生态水文调节服务供需评估所需数据

ALOS:高级陆地观测卫星 Advanced land observing satellite;HWSD:世界土壤数据库 Harmonized world soil database;CMADS:SWAT 模型中国 大气同化驱动集 China meteorological assimilation datasets for the SWAT model

2.2 应对暴雨洪涝灾害的平原城市生态水文调节服务供需关系研究框架

平原城市地形起伏不明显、水动力较弱,暴雨后极易引发局部积水内涝。另外,平原也是人类生存和发展的优势地形,我国人口密集、经济活跃的城市大部分建设在平原之上,平原城市的暴雨洪涝灾害需要高度重视。生态系统对陆地水循环过程的所有影响都可以称为水文调节,例如调节地表径流、控制雨水蓄渗、影响植物蒸腾^[35]。其中,地表径流调节可以有效处理降雨时的溢流及积水问题^[36]。因此,本文采用地表径流调节表征暴雨洪涝灾害下城市生态水文过程的调节作用,明确应对暴雨洪涝灾害的城市生态水文调节服务的生态供给和社会需求分别对应城市生态水文调节服务能力和暴雨洪涝灾害风险。根据平原城市特征选择了供需评价方法和指标体系,构建了研究技术路线(图 2)。主要包括步骤:(1)基于 SWAT 模型模拟实际土地利用情景和潜在裸露无植被情景下的地表径流,并验证结果有效性;(2)根据实际和潜在两种情景的地表径流模拟结果计算生态径流调节率,同时引入城市排水简化模型修正生态径流调节率计算结果,得到"社会-生态"综合影响下的城市生态水文调节服务供给能力;(3)利用 RF 模型预测暴雨洪涝敏感性,利用 AHP-熵权组合权

重法评价暴雨洪涝脆弱性,两者叠加得到城市生态水文调节服务需求水平;(4)划分城市生态水文调节服务 生态供给与社会需求的供需空间匹配类型,并利用优先级指数公式对两者供需匹配关系进行排序,进行规划 干预等级分区。



图 2 研究技术路线 Fig.2 Research technical route

1.3 研究方法

1.3.1 城市生态水文调节服务供给测度

(1)地表径流模拟、率定和验证。SWAT 模型是一个具有连续时间、半分布式、基于过程的水文模型,模型 的子模块主要包括地表径流、河道径流、输移损失等^[4,39]。已有研究证明 SWAT 模型在平原城市地表径流模 拟方面也具有较佳的表现^[40]。径流模拟的步骤:①基于 DEM 和行洪河道在天津市计算生成 322 个子流域, 最小面积为 4000hm²;②设定土壤类型(8%)和土地利用类型(8%)的最小百分比阈值,融合具有相似水文特 性的区域,在全域划分水文响应单元;③添加气象数据构建 SWAT 基础数据库,气象数据包括每日最高气温、 最低气温、降雨量、平均风速和太阳辐射;④利用 SWAT 和 SWAT-CUP 模型对天津市 2008—2018 年的地表径 流进行模拟、率定和验证。其中预热期为 2008—2010 年,率定期为 2011—2015 年,验证期为 2016—2018 年。 率定过程采用 SWAT-CUP 模型中自带的敏感性分析方法对研究区的径流相关参数进行敏感性分析,选择 SWAT-CUP 模型中的 SUFI2 的算法对敏感性较高的参数进行率定,并结合《SWAT2012 官方校准说明》提供的 参数区间以及每次率定的参数推荐范围不断调整,依次进行选代运算,直到完成校准工作。验证过程采用相 对误差 *R*。机关系数 *R*²和效率系数 *NS*,这 3 个指标对模型的参数校准及验证结果进行评价^[39,41]。

效率系数 NS:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{j=1}^{n} (Q_{o,j} - Q_{p,j})^{2}}{\sum_{j=1}^{n} (Q_{o,j} - Q_{o,avg})^{2}}$$
(1)

相对误差 R_{e} :

$$R_{e} = \frac{\sum_{j=1}^{n} (Q_{p,j} - Q_{o,j})}{\sum_{j=1}^{n} Q_{o,j}}$$
(2)

相关系数 R²:

$$R^{2} = \frac{\left[\sum_{j=1}^{n} (Q_{o,j} - Q_{o,avg}) (Q_{p,j} - Q_{p,avg})\right]^{2}}{\sum_{j=1}^{n} (Q_{o,j} - Q_{o,avg})^{2} \sum_{j=1}^{n} (Q_{p,j} - Q_{p,avg})^{2}}$$
(3)

式中: $Q_{o,j}$ 和 $Q_{p,j}$ 分别为时间段 j 的观测径流量和模拟径流量(m³/s); $Q_{o,avg}$ 和 $Q_{p,avg}$ 分别为观测径流量和模拟径 流量的平均值(m³/s);n 为序列长度。

(2)生态水文调节率计算。为分析生态系统提供的水文调节服务,以实际生态覆被为基准情景,以极端 退化贫瘠无植被为潜在情景,即替换森林、灌木林和草地等全部有植被的土地利用类型为贫瘠土地。然后分 别对两种情景进行地表径流模拟,并根据模拟结果计算生态水文调节量和生态水文调节率^[4]。用生态水文 调节率表征生态系统的水文调节服务能力。相关公式如下:

$$W = \sum_{i=1}^{m} (Q_{ck} - Q_i) \times A_i \times 1000$$
(4)

$$C_r = W \times (1000 \times P \times A)^{-1} \times 100\%$$
⁽⁵⁾

式中:W为生态水文调节量(m³); Q_{ek} 为贫瘠无植被情境潜在径流深(mm); Q_i 为子流域*i*的基准情景实际径 流深(mm);*m*为子流域数目; A_i 为子流域*i*的面积(km²); C_r 是子流域的水文调节率(%);*P*是子流域的降雨 量(mm);*A*为子流域的面积(km²)。

(3)城市排水能力修正。"生态-社会"二元水循环理论^[42]中城市水文调节能力由生态水文和社会排水 共同组成。由于城市排水管网数据获取难度大,相关研究多采用简化模式^[19,43],即根据《室外排水设计规 范》以及《天津市雨水径流量计算标准》,设定天津标准排水能力为重现期为一年的小时降雨量。假设该情境 下的降雨量可以通过管网全部排走,反映了城市的设计排水能力,可以利用天津暴雨强度公式计算得出。最 后将生态水文调节服务能力和城市排水能力归一化后等权相乘,得到修正后的"生态-社会"水文调节服务能 力,即为城市生态水文调节服务供给能力。

2.3.2 城市生态水文调节服务需求测度

暴雨洪涝敏感性是指区域发生暴雨洪涝事件的概率,与地形地貌和水文气象条件有关。暴雨洪涝脆弱性 是指暴雨洪涝灾害下城市经济遭受损失、居民受伤死亡的可能性。但高敏感性并不代表高风险,考虑灾害敏 感性和脆弱性的综合风险评估能够更加准确的识别城市暴雨洪涝风险区^[24-25]。

(1)暴雨洪涝敏感性预测。暴雨洪涝的发生受到诸多环境因素的影响,评估是由大量标准组成的复杂决策过程。基于多准则决策(MCDM)的 FSM 方法已经被证明是暴雨洪涝风险地区建设管理和研究观察的有效手段^[24]。RF 模型是一种机器学习模型,适用于解决多分类和回归问题,是 Bagging 集成学习和随机子空间方法的结合。RF 模型预测过程对解释变量之间可能存在的多重共线性敏感性较低。同时在数据存在缺失和单位差异的情况下仍具有稳定的预测能力^[29]。因此,本文采用 RF 模型和 FSM 结合的方法预测天津暴雨洪涝的敏感性,具体步骤:①选择敏感因子。根据相关研究和天津的地理条件,选择暴雨洪涝敏感性评估因子(表 2)。其中坡度、高程、曲率、地形湿度指数(TWI)、河流功率指数(SPI)和泥沙输送指数(STI)可以利用相关公式从 DEM 数据中获取^[25]。

地形湿度指数 TWI:

$$TWI = \ln\left(\frac{A_s}{\tan\beta}\right) \tag{6}$$

河流功率指数 SPI:

$$SPI = \ln(A_s \times \tan\beta) \tag{7}$$

泥沙输送指数 STI:

$$STI = (m+1) \left(\frac{A_s}{22.13}\right) m \left(\frac{\sin\beta}{0.0896}\right) n$$
(8)

式中:*A_s*为单位轮廊宽度的流域贡献面积(m²/m);*β*为坡度,角度制;*m*和*n*分别为坡长和坡度因子,反映地 形对地表土层侵蚀的影响,现取 *m*=0.6,*n*=0.3。由于随机森林模型需要将因子转换为数值,引入灾害敏感性 常用的频率比值(*FR*)^[44-45]来确定离散型数据各类别的信息量,该比值可以表示为各类别所包含的积水点数 目比例与对应类别所占面积之比,计算公式:

$$FR = \left(\frac{N_{ij}}{A_{ij}} / \frac{N_r}{A_r}\right) \tag{9}$$

式中:*N_{ij}*为敏感因子*i*的第*j*个子类别中的积水点数;*A_{ij}*为对应子类别的面积(km²);*N*,为研究区积水灾害点 总数;*A*,为研究区域的总面积(km²)。②抽取实验样本。包含历史积水点的网格单元共 228 个,属性标记为 "1"。另外在原始区域中随机选取不包含积水点的网格单元,然后采用人工识别的方法剔除临近水体、地势 低洼等明显具有积水特征的随机点,以最大限度规避随机取样存在的误差。最后生成与正例数据集(包含历 史积水点的网格单元)等量的负例数据集,属性标记为 "0",并将正负例数据集构成的实验样本按 70%和 30% 的比例划分训练集和测试集^[25, 29];③在 python3.6 平台实现 RF 模型运行,通过 GridSeachCV 模块对模型进行 参数调优,主要参数设置如下:n_estimators 值为 485,max_depth 值为 5,min_samples_split 值为 60,min_samples _leaf 值为 40;④通过 ROC 曲线及 AUC 值对 RF 模型性能进行定量评价,最后将所有原始数据输入通过评价 的模型进行全域暴雨洪涝敏感性预测。

Table 2 Sensitivity assessment factors of rainstorm-flood disaster				
因子类型	影响因子及文献来源	数据类型	说明	
Factor type	Impact factors and references	Data type	Explanation	
水文气象	地表径流[45-46]	连续	地表径流是地表饱和至满负荷时发生的水流	
Hydrometeorological	降雨量[23-25, 29]	连续	降雨是导致洪涝的最直接因素	
	河网密度[23-24]	连续	河流总长度与面积之比,密度越高危险越大	
	河流的距离 ^[23—24, 29, 46]	连续	远离河流的地方,存在较低的洪涝泛滥可能性	
地形地貌	高程 ^[23—25, 29]	连续	由于重力作用,雨水会扩散到低处	
Topography	坡度[23-24, 29]	连续	地势平坦、坡度较低的区域会可能出现大量积水	
	表面曲率[23, 29, 46-47]	连续	区域中零曲率通常比正、负曲率更容易发生洪水	
	TWI ^[23-25, 29, 47]	连续	TWI 能预测易受潮湿地表影响, 地表径流高的区域	
	SPI ^[25, 29, 45, 47]	连续	SPI 是流域特定区域内雨水侵蚀和排放能力的指标	
	STI ^[46-47]	连续	STI 定义了由于雨水径流引起的沉积物运动	
	土壤类型 ^[23-25, 29, 46]	离散	土壤能够决定雨水的入渗、径流等过程	
	NDVI ^[25, 29]	连续	植被具有缓解洪涝危害的能力,覆盖度越高越安全	
	土地利用[23-25, 29, 46-47]	离散	不同类型的土地利用对径流过程控制作用不同	
	岩性[24, 29, 45-47]	离散	岩性单元会影响水文过程(水体的流量和速度)	
人类干预 Human interference	主干道距离[23]	连续	修建道路会改造地表,也会影响洪涝的产生	

表 2 暴雨洪涝敏感性评估因子

TWI:地形湿度指数 Topographic wetness index;SPI:河流功率指数 Stream power index;STI:泥沙输送指数 Sediment transport index;NDVI:归一 化植被指数 Normalized difference vegetation index

4934

(14)

(2)暴雨洪涝脆弱性评价。在城市暴雨洪涝应急管理中,脆弱性是最重要的组成部分^[24]。根据暴雨洪涝 灾害发生后对城市的影响,构建暴雨洪涝灾害脆弱性评价体系(表 3),利用 AHP-熵权组合法计算脆弱性指 数,主要步骤:①选择极差标准化法将相关指标数据无量纲化处理^[21];②通过主客观结合的方法,利用 AHP 法和熵权法分别计算出主观和客观权重(表 4),然后引入距离函数,采用线性组合法^[48]得出暴雨洪涝脆弱性 的组合权重;③按照确定的指标权重值计算暴雨洪涝脆弱性。组合权重表达式:

$$w_i = \alpha w'_i + \beta w''_i \tag{10}$$

$$d(w'_{i}, w''_{i}) = \left[\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n} (w'_{i} - w''_{i})^{2}\right]^{\frac{1}{2}}$$
(11)

$$D = |\alpha - \beta| \tag{12}$$

$$\int d (w'_{i}, w''_{i})^{2} = (\alpha - \beta)^{2}$$
(13)

$$(\alpha + \beta = 1)$$

式中: w_i 为组合权重; w'_i 为主观权重; w''_i 为客观权重; α 、 β 是权重的分配系数, α + β =1;D为分配系数间的 差异。

(3)城市生态水文调节服务需求。暴雨洪涝风险性是暴雨洪涝灾害的敏感性以及脆弱性的共同作用结果,即反映暴雨洪涝灾害下城市生态水文调节服务需求水平。计算公式如下:

$$R = H \times V$$

式中:R为暴雨洪涝灾害下城市生态水文调节服务需求水平;H为暴雨洪涝灾害的敏感性;V为脆弱性。

Table 3 Vulnerability assessment factors of rainstorm-flood disaster				
影响因子及文献来源	数据类型	相关性	说明	
Impact factors and references	Data type	Correlation	Explanation	
人口密度[24]	连续	正向	在任何灾害中 人口都县港在生命合险的主要指标	
Population density	正 决	112 [4]	在任何代告于,八日都是咱在王师范陲的王女宙你	
夜间灯光 ^[49]	冻绕	正向	夜间灯光和城市社会经济发展在空间分布上基本	
Night light	足线	山門	保持一致	
耕地占比 ^[50]	冻绕	正向	计进合流识十世优物 迭成立故受招	
Proportion of cultivated land	足线	山門	供伤云沌仅八月针初,迫风)收支顶	
建筑密度[50]	冻绕	正向	计进合对民民占成得她 和水笑台宇	
Building density	足线	山門	供伤云州庙氏点风区瑶、惊小寺旭青	
道路密度[24]	法法	正向	道呐油漆奶后会导动通信和可计州古西山珊菇店	
Road density	连续	꼬마	但时候他仅但云寸以通信相可达性力面击境瘫痪	

表 3 暴雨洪涝脆弱性评估因子

表 4 暴雨洪涝脆弱性因子权重

Table 4 weight of rainsform-flood vulnerability factors			
脆弱性指标 Vulnerability index	主观权重 Subjective weight	客观权重 Objective weight	组合权重 Combination weight
人口密度 Population density	0.285	0.431	0.345
夜间灯光 Night light	0.125	0.214	0.161
耕地占比 Proportion of cultivated land	0.196	0.223	0.207
建筑密度 Building density	0.142	0.077	0.116
道路密度 Road density	0.250	0.055	0.171

2.3.3 城市生态水文调节服务供需匹配关系分析

(1)基于 z-score 标准化象限法的供需匹配类型划分

为了比较供给能力和需求水平之间的空间匹配关系,分别对供给和需求的评估结果进行 z-score 标准化处理,并通过划分象限进行供需匹配分析^[12,19]。以 x 轴表示城市生态水文调节服务标准化的供给量, y 轴表

示城市生态水文调节服务标准化的需求量,划分出四种供需匹配状态象限:高供-高需(Ⅰ象限)、低供-高需(Ⅱ象限)、低供-低需(Ⅲ象限)、高供-低需(Ⅳ象限)。然后利用双变量局部空间自相关模型(LISA)分析城市 生态水文调节服务供需空间聚集程度^[12]。

(2)基于优先级指数法的供需匹配关系排序

为了指导城市规划以提升暴雨洪涝灾害下的城市韧性能力,在供需匹配类型划分的基础上,进一步通过 优先级指数(PRI)^[19]对研究区内供需关系进行排序,得到规划优先干预的排名,计算公式:

$$PRI = \frac{R}{S}$$
(15)

式中:R为暴雨洪涝灾害下城市生态水文调节服务需求水平;S为暴雨洪涝灾害下城市生态水文调节服务供给能力。当需求水平越高,供给能力越低,PRI分值越大,该地区越需要优先干预。

3 结果与分析

3.1 天津市生态水文调节服务供给能力

3.1.1 水文模拟结果验证

利用天津海河闸站水文 2008—2018 年逐月径流数据对模拟结果进行率定和验证。结果如表 5,参考水 文模拟精度判识方法,相关系数(*R*²)在 0.6—1.0 之间、效率系数(*NS*)在 0.5—1.0 之间和相对误差(*R_e*)<25.0 时,模型模拟效果较好^[41]。由图 3 可见,水文站模拟径流与实际径流在模拟期的流量变化具有较高的契合 度,表明模型结果可用。潜在情景和实际情景下模拟径流深结果见图 4。

Table 5 Evaluation of simulation effect of monthly runoff of hydrological station				
水文站径流量模拟	相关系数	效率系数	相对误差	
Runoff simulation of hydrological station	R^2	NS	R_e /%	
率定期 Parametric rate period	0.82	0.75	12.76	
验证期 Verification period	0.71	0.70	13.25	

表 5 水文站月径流量模拟效果评价

 R^2 :相关系数 R-squared; NS: 效率系数 Nash-sutcliffe; R_e : 相对误差 Relative error







3.1.2 城市生态水文调节服务供给能力空间特征

由于 SWAT 模型划分的子流域边界和天津市行政边界有细微差别,因此对于不重合部分需要进行参数移植,根据空间位置采用临近子流域的模拟结果近似代替^[4]。修正后的天津市生态水文调节服务供给能力如 图 4 所示,利用自然断点法将评估结果分为五个等级:高供给能力(20.84%)、较高供给能力(10.70%)、中供 给能力(32.41%)、较低供给能力(22.62%)和低供给能力(13.43%),各等级面积占比较为均匀。天津市生态

水文调节服务供给能力整体呈现东南沿海高、西北近山低的分布特征。高供给能力区主要涵盖了市内六区、 北辰区、西青区和东丽区,滨海新区东南和西北位置以及津南区的北部也有大面积高供给能力区聚集。这些 区域城市化水平高于周边区县,具有城市发展优先性,相应的排水设施建设水平和生态保护意识也较高。低 供给能力区主要聚集在宁河区和蓟州区。其中,宁河区范围内低供给能力区的土地利用类型多为耕地,蓟州 区相应的区域则分布大量的森林。

4937



图 4 潜在、实际径流深和城市生态水文调节服务供给能力 Fig.4 Potential, actual runoff depth and urban eco-hydrological regulation service supply capacity

3.2 天津市生态水文调节服务需求水平

3.2.1 暴雨洪涝敏感性

RF 模型预测性能可以利用 ROC 曲线及 AUC 值定量评价。ROC 曲线数值的分布范围为[0,1],曲线越 陡,则模型预测精度越高。AUC 取值范围在 0.5—1 之间, AUC 值和训练模型的预测能力成正相关,当 AUC> 0.9 表示预测效果非常好^[29,45]。如图 5 所示,模型 AUC 值达到 0.92,表明模型的预测效果较优。随机森林模型返回的敏感性因子重要性评价结果表明,在该研究区域中,土地利用、河网密度和 NDVI 表现出较高的暴雨







http://www.ecologica.cn

洪涝灾害敏感性。RF模型对天津全域敏感性预测的结果见图 6,暴雨洪涝敏感性整体呈现高值聚集,低值分散的空间特征。高敏感区主要聚集在市内六区及周边以及滨海新区中部新城。滨海新区南部天津南港工业区附近,以及津滨交通走廊沿线也有大量高敏感区分布。

3.2.2 暴雨洪涝脆弱性

暴雨洪涝脆弱性的评价结果如图 6 所示,整体分布规律表现为中部高,北部山区、东南部湿地及沿海区域低。建成区内高、建成区外低。脆弱性较高的区域集中出现在市内六区,静海区、津南区、武清区和滨海新区的核心建设区也有少量分布。总的来说,脆弱性空间分布特征和人口聚集度、建设集中度有着密切关系。 3.2.3 城市生态水文调节服务需求水平空间特征

为了评估天津市暴雨洪涝风险,即城市生态水文调节服务需求水平。将敏感性和脆弱性评估结果相乘, 得到天津暴雨洪涝风险(图6)。同样,利用自然断点法分为五个等级:高需求水平(1.35%)、较高需求水平 (2.76%)、中需求水平(9.74%)、较低需求水平(35.80%)和低需求水平(50.35%),各级之间存在较大的面积 悬殊,低需求水平区占比最高。需求水平空间分级呈现"中间高周围低"的整体趋势,其中高需求水平区表现 出"中心聚集"的分布特征,并向周边阶梯递减,主要集中在市内六区,覆盖和平区全域。滨海新区也出现两 处高需求区,分别是紫荆花园和滨海智谛山片区。另外,周边区县的建成区附近也有较高需求水平区零星 分布。



Fig.6 Sensitivity, vulnerability of rainstorm-flood and urban eco-hydrological regulation service demand level

3.3 天津市生态水文调节服务供需空间匹配分析

基于象限法的供需匹配分析结果见图 7,四种供需匹配类型以低供-低需(40.92%)为主,低供-高需(12.83%)的区域偏少。说明天津市生态水文调节服务供需关系整体良好,大部分地区供给能够相对匹配需求,局部地区出现供需匹配程度低的现象。同时,在进行供需双变量局部自相关分析时,其 Moran's *I* 指数值为0.328,表明供给和需求具有一定的空间正相关性。如图 7 所示,在 95%的置信度下,天津大部分地区均显示不显著性(59.14%),即供需无显著的聚合现象。低供-低需聚集区(19.42%)显著性较为明显,低供-高需聚集区(2.06%)的显著性最弱。从空间分异来看,高供-高需聚集区主要分布在市内六区及周边区域、滨海新区

4939

核心区以及津滨交通走廊沿线两侧;高供-低需聚集区主要出现在滨海新区西南部,其他区域也有小面积零星 分布;低供-低需聚集区集中于宝坻区和宁河区的交界处,其次在城市北部蓟州山区和城市南部北大港湿地也 有大面积聚集;低供-高需聚集区分布相对分散,但明显形成六大片区,分别是蓟州城区、宝坻城区、武清城区、 静海城区、宁河城区以及滨海新区核心区东部区域。

3.4 天津市生态水文调节服务规划干预优先级划分

在供需象限划分的基础上利用优先级指数进一步揭示供需之间的失衡程度,从而准确划分规划干预次序。利用自然断点法将结果分为五个规划干预等级:I级干预区(43.96%)、II级干预区(35.66%)、III级干预 区(15.21%)、IV级干预区(3.81%)和V级干预区(1.60%)。干预区级别越高,说明该区域水文调节服务供需 匹配度越低,具有规划干预的迫切性,IV级和V级为规划优先干预区。如图7所示,供需评估结果具有较高 的空间识别度,等级划分清晰。大部分地区供需关系相对乐观,均为I级和II级干预区,IV级和V级干预区 占比较低,呈点状零散分布。市内六区中V级干预区聚集在中心位置,边缘区以IV和III级干预区为主。滨 海新区靠近天津港的区域干预区等级较高,多为IV级和V级干预区。另外,在宁河区南崔庄村、滨海新区金 翔商厦、蓟州区中医医院、宝坻区人民医院、武清区瑞通大厦和静海区静海站附近区域也存在小面积IV级和 V级干预聚集区,这些区域均处于所在区人口密度较高的集中建设区内。





4 结论与讨论

4.1 结论

本文构建应对暴雨洪涝灾害的平原城市生态水文调节服务供需空间匹配研究框架,以我国典型的沿海平 原城市——天津市为例,基于多源数据,利用 SWAT 模型、RF 模型等空间分析工具定量评估分析天津市生态 水文调节服务的供给能力和需求水平及空间分布特征,通过象限法对比分析供需匹配类型,并在此基础上对 供需空间匹配关系进行排序,得到五级规划干预区。主要结论如下:

(1)城市生态水文调节服务供给能力呈现东南沿海高、西北近山低的空间分布特征。市内六区、北辰区、

西青区、东丽区全域以及津南区和滨海新区的局部区域具有相对较高的水文调节能力。城市生态水文调节服 务需求水平整体呈现"多中心聚集,圈层向外递减"的分布规律。高需求的区域分布在市内六区和滨海新区 核心区。

(2)城市生态水文调节服务的供需匹配关系分为高供-高需型、低供-高需型、低供-低需型和高供-低需型 四种,低供-低需(40.92%)在四种匹配类型中占据主导。供给和需求呈现一定正相关关系,大部分空间供需 聚集特征不显著性(59.14%),低供-低需空间聚集在四种匹配类型中最明显。

(3)城市生态水文调节服务供需比存在明显的空间差异,对应的规划优先干预区(IV级和V级)占比 5.41%,整体与建成区分布一致,大部分集中在市内六区,其次是滨海新区的核心地段,是未来规划优先提升 的重点。

4.2 讨论

本研究基于供需角度构建应对暴雨洪涝灾害的城市生态水文调节服务供需评估框架,并对天津市进行实例研究,旨在为城市社会安全和生态可持续发展提供新的视角和启示。

首先,本文在生态系统服务供需理论基础^[18]上建立了暴雨洪涝特定社会需求下的生态水文调节服务供 需关系。将城市生态水文调节服务和暴雨洪涝灾害风险统筹到一个研究框架,明确了生态供给和社会需求的 主体,能够有效分析城市生态和社会提供的水文调节服务与城市发展需要的暴雨洪涝调节能力之间存在的空 间错配问题,为利用生态水文调节服务增强城市抵御暴雨洪涝灾害的研究提供了新的视角。

其次,集合水文模型精确模拟和机器学习智能预测的量化评估方法能够较好的满足市域尺度的平原城市 供需评估。其中,SWAT 水文模型所需数据获取容易,实验过程简单易学,模拟结果详细准确,具有较好的普 及性^[32,40]。基于 RF 模型和 FSM 方法的暴雨洪涝风险评估能够有效预测暴雨洪涝发生的可能性,解决了以 往研究^[19]中洪涝风险评估方法依赖大量高精度数据和复杂的模拟过程,并难以适用地形起伏不明显的大尺 度平原城市的问题。两者的结合可以清晰呈现城市生态水文调节服务供给能力和需求水平的空间异质性,是 未来可以在相似研究区域推广的量化评估方法。

第三,供需失衡关键区识别具有指导城市规划的实践意义。供需匹配类型的划分可以快速全面了解不同 区域城市生态水文调节服务供需错配状态^[12],从而方便城市规划的分类管控,例如在高需求的区域侧重暴雨 洪涝防控,在低供给的区域侧重生态水文治理引导。基于供需匹配的优先级划分能够更加精准的识别出供需 失衡的关键区域,突出规划干预的重点和次序^[19],从而制定具有针对性和时序性的规划应对策略,进而提高 城市规划工作的科学性和高效性。

另外,本文仍存在以下局限:在城市生态水文调节服务供给方面,利用排水简化模型修正的方法虽然考虑 了社会方面的影响,但仍难以反映城市管网实际排水能力,也难以描绘城市生态水文调节服务中社会和生态 相互作用,协同影响的复杂关系^[42],未来需要更精确的管网数据,并基于二元水循环理论深入探析。在暴雨 洪涝敏感度预测方面,由于高精度源数据获取难度较大,导致目前暴雨洪涝预测精度仅能达到1km,未来将进 一步提高数据精度,并尝试在微观尺度进一步精确模拟供需失衡关键区域中易涝点的淹没深度和范围,为供 需视角下城市暴雨洪涝防控提供精细化指导。在供需关系研究方面,虽然对水文调节服务供需关系进行了匹 配和排序,但仍无法充分反映生态系统服务供需平衡内部机理,充分深入分析供需失衡影响因素和机制将成 为相关研究的未来趋势;供需评估结果仅能反映当下供需情况,然而生态水文调节服务供需关系是动态变化 的^[18],未来需要结合城市发展规划与建设对生态水文调节服务供需定期评估并调整规划干预区。

参考文献(References):

- [1] UNDRR/CRED. The human cost of disasters: an overview of the last 20 years (2000-2019). [2022-04-20]. https://www.undrr.org/publication/ human-cost-disasters-overview-last-20-years-2000-2019.
- [2] 许乙青,喻丁一,冉静.基于流域协同的国土空间雨洪安全格局构建方法.自然资源学报,2021,36(9):2335-2349.
- [3] 刘春芳,王韦婷,刘立程,李鹏杰.西北地区县域生态系统服务的供需匹配——以甘肃古浪县为例.自然资源学报,2020,35(9):

2177-2190.

- [4] 孙倩莹,高艳妮,张林波,王昊,李凯.基于土地利用的厦门市生态水文调节服务评估.环境科学研究, 2019, 32(1): 66-73.
- [5] 刘颂, 谌诺君. 绿色基础设施水文调节服务的供给机制及提升途径. 风景园林, 2019, 26(2): 82-87.
- [6] Mabon L. Enhancing post-disaster resilience by 'building back greener': evaluating the contribution of nature-based solutions to recovery planning in Futaba County, Fukushima Prefecture, Japan. Landscape and Urban Planning, 2019, 187: 105-118.
- [7] 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.
- [8] 王晓学, 沈会涛, 李叙勇, 景峰. 森林水源涵养功能的多尺度内涵、过程及计量方法. 生态学报, 2013, 33(4): 1019-1030.
- [9] 邓伟,刘红,李世龙,袁兴中,张跃伟,李波,齐静.重庆市重要生态功能区生态系统服务动态变化.环境科学研究,2015,28(2): 250-258.
- [10] Xia R, Chen Z, Zhou Y. Impact assessment of climate change on algal blooms by a parametric modeling study in Han River. Journal of Resources and Ecology, 2012, 3(3): 209-219.
- [11] 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.
- [12] 谢余初,张素欣,林冰,赵银军,胡宝清.基于生态系统服务供需关系的广西县域国土生态修复空间分区.自然资源学报,2020,35(1): 217-229.
- [13] 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.
- [14] 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. Science of the Total Environment, 2014, 470-471: 567-577.
- [15] Bagstad K J, Villa F, Batker D, Harrison-Cox J, Voigt B, Johnson G W. From theoretical to actual ecosystem services: mapping beneficiaries and spatial flows in ecosystem service assessments. Ecology & Society, 2014, 19(2): 64.
- [16] 郭朝琼,徐昔保,舒强. 生态系统服务供需评估方法研究进展. 生态学杂志, 2020, 39(6): 2086-2096.
- [17] 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.
- [18] 申嘉澍,李双成,梁泽,王玥瑶,孙福月.生态系统服务供需关系研究进展与趋势展望.自然资源学报,2021,36(8):1909-1922.
- [19] 辛儒鸿,曾坚,李凯,王倩雯,丁锶湲.城市内涝调节服务供需关键区识别与优先级划分.生态学报,2022,42(2):500-512.
- [20] 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.
- [21] 杨海峰, 翟国方. 灾害风险视角下的城市安全评估及其驱动机制分析——以滁州市中心城区为例. 自然资源学报, 2021, 36(9): 2368-2381.
- [22] Hong H Y, Tsangaratos P, Ilia I, Liu J Z, Zhu A X, Chen W. Application of fuzzy weight of evidence and data mining techniques in construction of flood susceptibility map of Poyang County, China. Science of the Total Environment, 2018, 625: 575-588.
- [23] Arora A, Arabameri A, Pandey M, Siddiqui M A, Shukla U K, Bui D T, Mishra V N, Bhardwaj A. Optimization of state-of-the-art fuzzymetaheuristic ANFIS-based machine learning models for flood susceptibility prediction mapping in the Middle Ganga Plain, India. Science of the Total Environment, 2021, 750: 141565.
- [24] Das S. Flood susceptibility mapping of the Western Ghat coastal belt using multi-source geospatial data and analytical hierarchy process (AHP). Remote Sensing Applications; Society and Environment, 2020, 20; 100379.
- [25] Chowdhuri I, Pal S C, Chakrabortty R. Flood susceptibility mapping by ensemble evidential belief function and binomial logistic regression model on river basin of eastern India. Advances in Space Research, 2020, 65(5): 1466-1489.
- [26] Rahmati O, Zeinivand H, Besharat M. Flood hazard zoning in Yasooj region, Iran, using GIS and multi-criteria decision analysis. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2016, 7(3): 1000-1017.
- [27] Samanta S, Pal D K, Palsamanta B. Flood susceptibility analysis through remote sensing, GIS and frequency ratio model. Applied Water Science, 2018, 8(2): 66.
- [28] Al-Juaidi A E M, Nassar A M, Al-Juaidi O E M. Evaluation of flood susceptibility mapping using logistic regression and GIS conditioning factors. Arabian Journal of Geosciences, 2018, 11(24): 765.
- [29] Chen W, Li Y, Xue W F, Shahabi H, Li S J, Hong H Y, Wang X J, Bian H Y, Zhang S, Pradhan B, Ahmad B B. Modeling flood susceptibility using data-driven approaches of naïve Bayes tree, alternating decision tree, and random forest methods. Science of the Total Environment, 2020, 701: 134979.
- [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] 高均海. 京津冀平原城市洪涝综合治理的若干问题研究. 自然灾害学报, 2020, 29(4): 1-7.

- [32] 陈沛源,李金文,俞巧,郭嘉兵,马金珠.基于 SWAT 模型的泾河流域地下水分布特征与水资源评价. 灌溉排水学报,2021,40(12): 102-109,126-126.
- [33] 戴文远, 江方奇, 黄万里, 廖李红, 姜坤. 基于"三生空间"的土地利用功能转型及生态服务价值研究——以福州新区为例. 自然资源学报, 2018, 33(12): 2098-2109.
- [34] 王倩雯, 曾坚, 杨斌. 城市用地形态对城市积水的影响研究. 城市发展研究, 2021, 28(8): 17-24.
- [35] 廖文婷,邓红兵,李若男,郑华.长江流域生态系统水文调节服务空间特征及影响因素:基于子流域尺度分析.生态学报,2018,38(2): 412-420.
- [36] 赵银兵,蔡婷婷,孙然好,倪忠云,张婷婷.海绵城市研究进展综述:从水文过程到生态恢复.生态学报, 2019, 39(13): 4638-4646.
- [37] Meng X Y, Wang H, Shi C X, Wu Y P, Ji X N. Establishment and evaluation of the China meteorological assimilation driving datasets for the SWAT model (CMADS). Water, 2018, 10(11): 1555.
- [38] Meng X Y, Wang H, Chen J. Profound impacts of the China meteorological assimilation driving datasets for the SWAT model (CMADS). Water, 2019, 11(4): 832.
- [39] 白琪阶, 宋志松, 王红瑞, 邓彩云, 赵勇. 基于 SWAT 模型定量分析自然因素与人为因素对水文系统的影响——以漳卫南运河流域为例. 自然资源学报, 2018, 33(9): 1575-1587.
- [40] 尹述政,许峰,王文荟,霍雯蓉,黄运新.四湖流域径流及蓝水绿水资源时空分布模拟.环境工程,2022,40(5):133-140.
- [41] 于成龙,王志春,刘丹,赵慧颖,宫丽娟,田宝星.基于 SWAT 模型的西辽河流域自然湿地演变过程及驱动力分析.农业工程学报, 2020, 36(22): 286-297.
- [42] 王浩, 贾仰文. 变化中的流域"自然-社会"二元水循环理论与研究方法. 水利学报, 2016, 47(10): 1219-1226.
- [43] 侯精明,郭凯华,王志力,荆海晓,李东来.设计暴雨雨型对城市内涝影响数值模拟.水科学进展,2017,28(6):820-828.
- [44] Aditian A, Kubota T, Shinohara Y. Comparison of GIS-based landslide susceptibility models using frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network in a tertiary region of Ambon, Indonesia. Geomorphology, 2018, 318: 101-111.
- [45] Tehrany M S, Pradhan B, Mansor S, Ahmad N. Flood susceptibility assessment using GIS-based support vector machine model with different kernel types. CATENA, 2015, 125: 91-101.
- [46] Mojaddadi H, Pradhan B, Nampak H, Ahmad N, Ghazali A H B. Ensemble machine-learning-based geospatial approach for flood risk assessment using multi-sensor remote-sensing data and GIS. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2017, 8(2): 1080-1102.
- [47] Kalantar B, Ueda N, Saeidi V, Janizadeh S, Shabani F, Ahmadi K, Shabani F. Deep neural network utilizing remote sensing datasets for flood hazard susceptibility mapping in Brisbane, Australia. Remote Sensing, 2021, 13(13): 2638.
- [48] 刘媛媛, 王绍强, 王小博, 江东, Ravindranath N H, Rahman A, Htwe N M, Vijitpan T. 基于 AHP_ 熵权法的孟印缅地区洪水灾害风险评估. 地理研究, 2020, 39(8): 1892-1906.
- [49] 张远生,曹智伟,韦蔚,胡洁.黄河流域夜间灯光数据与社会经济发展指标的时空耦合关系研究.测绘通报,2021,(10):20-27.
- [50] Rimal B, Zhang L F, Keshtkar H, Sun X J, Rijal S. Quantifying the spatiotemporal pattern of urban expansion and hazard and risk area identification in the Kaski district of Nepal. Land, 2018, 7(1): 37.