

DOI: 10.5846/stxb202012163199

辛儒鸿, 曾坚, 李凯, 王倩雯, 丁颀媛. 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.

Xin R H, Zeng J, Li K, Wang Q W, Ding S Y. Identify key areas and priority levels of urban waterlogging regulation service supply and demand. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(2): 500-512.

城市内涝调节服务供需关键区识别与优先级划分

辛儒鸿^{1,2}, 曾 坚^{1,*}, 李 凯², 王倩雯¹, 丁颀媛¹

1 天津大学建筑学院, 天津 300072

2 哥本哈根大学地理科学与自然资源管理系, 哥本哈根 1958

摘要:在全球气候变化和城市化背景下,城市内涝灾害频发,严重危及城市居民的人身安全、财产安全及公共安全。如何精准施策,针对关键区域进行城市内涝调节治理已成为社会各界关注并亟需解决的重要问题。基于生态系统服务供需视角,以径流调节率表征城市内涝调节的供给水平,以胁迫性、暴露性和脆弱性指标表征城市内涝调节的需求水平,构建了完整的技术路线和指标体系,从而识别城市内涝调节供需失衡的关键区,并确定规划干预的优先级。基于此,以岛屿型城市厦门岛为例,使用遥感数据和人口、社会、经济数据,运用 ArcMap10.8、ENVI5.3 和 GeoDA 平台,模拟评估了城市街区尺度下城市内涝调节服务的供需水平及空间分布特征。通过供需匹配将研究单元划分为:高供-高需,低供-高需,低供-低需和高供-低需 4 种类型,并识别出 114 个供需严重失衡的关键区,该类关键区面临城市内涝调节服务供给短缺的严峻挑战,是未来城市规划过程中需要重点优化的对象。在此基础上,使用优先级指数将关键区划分为 5 个规划干预优先级,明确了城市内涝治理的优先次序。研究结果为开展具有针对性的城市内涝调节治理实践提供了新的科学依据,同时在解决城市内涝灾害问题,推进以人为核心的新型城镇化方面具有重要理论与现实意义。

关键词:内涝灾害;生态系统服务;供需评估;关键区;优先级

Identify key areas and priority levels of urban waterlogging regulation service supply and demand

XIN Ruhong^{1,2}, ZENG Jian^{1,*}, LI Kai², WANG Qianwen¹, DING Siyuan¹

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

2 Department of Geoscience and Natural Resource Management, University of Copenhagen, Copenhagen 1958, Denmark

Abstract: In the context of global climate change and urbanization, urban waterlogging disasters occur frequently, which seriously endangers the personal safety, property safety and public safety of urban residents. How to prevent and control urban waterlogging in key areas has become an important issue that all sectors of society are concerned about and urgently need to be resolved. In this study, based on the perspective of the supply and demand of ecosystem service, we used runoff regulation rate to characterize the supply level of urban waterlogging regulation and expressed the demand level of urban waterlogging regulation by hazard index (surface runoff and municipal drainage capacity), exposure index (number of people and buildings affected by disaster), and vulnerability index (the composition of people affected by disaster and the types of buildings affected by disaster), so as to construct a technical route and indicator system. The purpose of this study is to identify the key areas where urban waterlogging regulates the imbalance between supply and demand, and to determine the priority of planning intervention. Based on this, we took Xiamen Island as an example, used remote sensing data and population, social, and economic data, and used ArcMap10.8, ENVI5.3 and GeoDA platforms to evaluate the supply and

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52078330);天津市科技计划项目(17PTGCCX00200)

收稿日期:2020-12-16; **网络出版日期:**2021-09-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 13602058416@vip.163.com

demand level and their spatial distribution characteristics of urban waterlogging regulation service at the block scale. We found that urban green space could effectively provide waterlogging regulation service, and woodland was stronger than grassland; at the same time, the waterlogging regulation service provided by urban green spaces was restricted by rainfall. Hazard index, exposure index, and vulnerability index jointly determined the level of demand for urban waterlogging regulation service. The spatial distribution results show that the supply and demand levels regulated by waterlogging have obviously spatial agglomeration characteristics. Furthermore, we used the matching degree of supply and demand to divide the research unit into four types: high supply-high demand, low supply-high demand, low supply-low demand, and high supply-low demand. 114 key areas with severe imbalance between supply and demand were identified. These areas are facing the challenge of shortage of waterlogging regulation supply and need to be optimized in the future urban planning process. On this basis, we used the priority index to divide these key areas into units with five planning intervention priorities, and clarified the priority areas of urban waterlogging management. The research results provide a new scientific basis for formulating targeted urban waterlogging management strategies. At the same time, it has important theoretical and practical significance in mitigating urban waterlogging disasters and promoting the new type of human-centric urbanization.

Key Words: urban waterlogging; ecosystem service; supply and demand assessment; key areas; priority

在全球气候变化和城市化背景下,城市内涝灾害风险逐年加剧,可持续发展面临严峻挑战^[1]。在中国,截至 2020 年,常住人口城市化率已超过 60%^[2],随着城市高密度化和集约化发展,城市生态空间大幅减少,生态系统的雨洪调节能力不断退化^[3-4],导致城市雨洪生态系统服务供需失衡^[5],城市内涝灾害频发^[6],严重危及城市居民的人身安全、财产安全及公共安全^[7]。新时期,“十四五”规划和 2035 年远景目标纲要中强调,要完善城市化战略,把人民生命安全和身体健康作为城市发展的基础目标,推进以人为核心的新型城镇化。因此,从全新视角审视城市内涝调节防控已成为社会各界广泛关注的重要问题^[8]。

生态系统服务是连接自然资本和人类福祉的关键桥梁,生态系统服务的产生和使用对应生态供给和社会需求^[9]。内涝调节服务作为与城市发展关系最紧密的服务类型之一,对缓解城市内涝灾害具有重要作用^[10-12]。目前,关于城市内涝的国内外理论研究主要聚焦于城市内涝的灾情模拟与风险评估^[13-15],成因机理与防治措施^[8,16-17],监测预警与应急管理^[18-19],及防涝设计标准与技术导则制定^[20-21]等方面。随着城市内涝灾害的综合性、复杂性和多样性等问题日益突出^[17,22],越来越多的学者开始从生态系统服务视角探索城市内涝的解决方案^[23-24]。主要归纳为两个方面:一是强调控制城市扩张和优化土地利用以减少人类对城市内涝调节服务的消耗和需求。如 BenDor 等^[25]论证了将生态系统服务纳入城市总体规划的必要性;Yu 等^[26]探讨了优化不透水地表布局对预防城市内涝的积极作用;匡文慧等^[27]研究了城市建成区土地利用/覆盖变化对内涝调节服务的影响。二是试图通过优化绿色基础设施等生态途径来提升城市内涝调节服务的供给能力。如 Merrow 等^[28]探讨了生态系统服务与绿色基础设施空间规划的内生关系;Maragno 等^[29]提出了以缓解城市内涝为导向的绿色基础设施精细化管理方法;李锋^[30]、肖华斌^[31]、顾康康^[32]、许超^[33]等论述了绿色基础设施对生态系统服务的影响,并提出了生态系统服务导向下的绿色基础设施布局与管理策略。已有研究拓宽了对城市内涝防控的认知范围,但总体上侧重于内涝调节服务的供给量化,关于受灾体对内涝调节服务的需求量化研究不足。同时,生态系统服务供需存在明显的空间异质性和空间错位特征^[34],已有研究尚未对内涝调节服务的供需关系进行体系探讨,导致无法明确哪些区域需要重点关注并优先干预,进而无法改善当前城市内涝防控布局不精准^[35],内涝调节效率低下^[36]等现实问题。

因此,本文系统梳理城市内涝研究脉络及内涝灾害特点,以内涝调节服务为切入点,重点关注城市发展需求和生态系统供给之间的关系,构建了城市内涝调节服务供需关键区识别与优先级划分的研究框架与指标体系。并基于厦门岛的城市发展现状及凸出环境问题,进行了城市内涝调节服务量化评估与空间制图。研究结果对提升城市内涝调节与防控能力,促进以人为本的新型城镇化发展目标具有重要应用价值。

1 研究区概况

厦门岛位于闽三角城市群核心地带,是厦门市的政治、经济、文化、商业中心。国土面积 157.76km²,整体地势南高北低,最高海拔 312m,四周环海,是典型的岛屿型城市(图 1)。由于厦门岛处于亚热带海洋性季风气候,近 15 年(2003—2017 年)的降雨数据显示,年降雨量和降雨天数总体呈上升趋势(图 2)。全年降雨高峰期间(5—9 月),强降雨和风暴潮事件频发,所产生的城市内涝灾害严重到影响城市居民的生命财产安全^[37-38]。因此,加强城市防涝基础设施建设,提升城市内涝灾害防治水平,是当前迫切需要解决的现实问题。

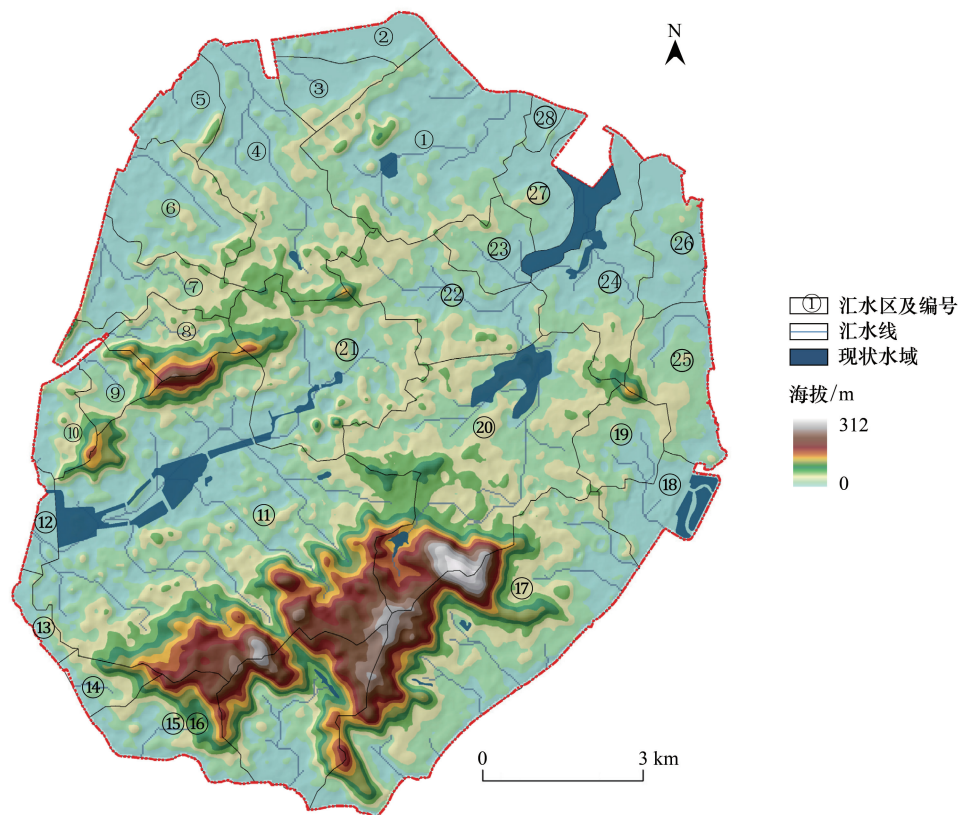


图 1 厦门岛 DEM 及汇水分区

Fig.1 DEM and catchment zone of Xiamen Island

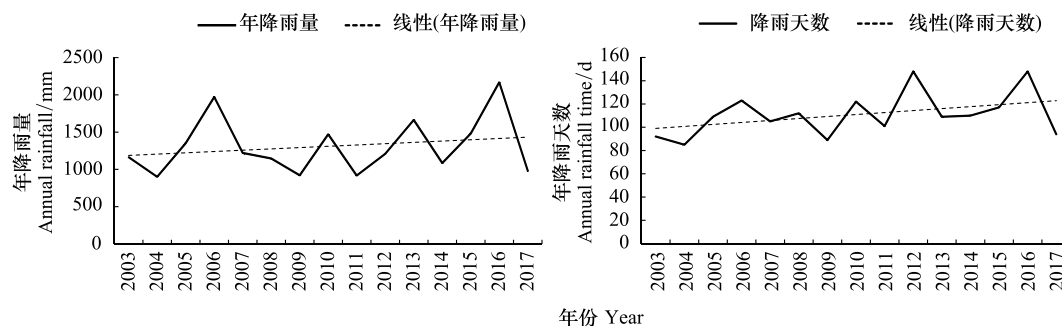


图 2 厦门岛近 15 年降雨趋势

Fig.2 Rainfall trends in Xiamen Island in the past 15 years

2 研究方法

2.1 数据来源及处理

研究选取 2017 年 8 月 15 日晴空 Landsat-8 OLI 遥感影像,使用 ENVI5.3 平台对遥感影像进行校正、裁剪和目视解译,将研究区用地分为:林地、草地、耕地、水体、建设用地和裸地六大类型;同时期 30m 分辨率 DEM 数据和遥感数据均源于中科院地理空间数据云网站。建筑密度,建筑普查数据源于中科院地理科学与资源研究所。居住小区及人口空间分布数据通过 Python 从安居客网站爬取获得。道路数据源于 Open Street Map。其它基础数据源于《厦门市城市总体规划(2011—2020)》及厦门市官方网站。分析过程基于 ArcMap10.8、ENVI5.3 和 GeoDA 平台完成。

2.2 指标选取及技术路线

城市内涝灾害涉及生态环境、人口安全及社会经济等多个方面^[39]。生态空间具有调节城市内涝的功效^[16,40],受灾体的生命财产安全是城市内涝防控所关注的关键要素^[40-41]。因此,本研究将绿地系统的供给水平(城市生态主体)和人的需求水平(城市社会主体)统筹到一个研究框架内,明确了供需指标体系,构建了研究技术路线(图 3)。主要包括 4 个步骤:(1)模拟城市降雨强度和地表径流量,具体指标包括:降雨量,降雨历时,土地利用覆盖度;(2)评估城市内涝调节服务供给能力,具体指标为:径流调节率。(3)评估城市内涝调节服务需求水平,主要指标包括:胁迫性指数(淹没深度),暴露性指数(人口暴露性、建筑暴露性)和脆弱性指数(生命脆弱性、结构脆弱性、财产脆弱性)。(4)城市内涝调节服务供需匹配及干预优先级划分,主要指标为:Z-score 标准化结果和优先级指数。

2.3 方法

2.3.1 城市降雨强度与地表径流量模拟

降雨强度是城市内涝灾害评估模型中的核心驱动变量。根据《厦门市暴雨强度公式》(福建省气候中心修订,2016),结合城市内涝危害最大化特征,采用短历时暴雨强度公式计算不同重现期内的暴雨强度,公式如下^[38]:

$$q = \frac{928.15 \times (1 + 0.716 \lg R)}{(t + 4.4)^{0.535}} \quad (1)$$

式中, q 是降雨强度 ($L \cdot s^{-1} \cdot hm^{-2}$); R 是降雨重现期 ($R = 1, 20, 50, 100, 200, 500a$); t 是降雨历时 ($t = 120min$)。

本研究采用美国农业部研发的 SCS-CN 水文模型模拟地表径流量,综合考虑土壤类型、土壤湿度、下垫面占比等因素对径流的影响^[42]。计算公式如下^[27]:

$$\begin{cases} Q = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} & (P \geq I_a) \\ Q = 0 & (P < I_a) \end{cases} \quad (2)$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (3)$$

式中, Q 是地表径流量 (mm); P 是降雨量 (mm); S 是最大可能滞留量 (mm)^[43]; I_a 是降水的初始下渗量, $I_a = \lambda \times S$, λ 是土壤的下渗系数,一般取值为 0.2^[44]; CN 表征地表产流能力,本研究参考 Fan 等提出的方法进行计算^[45],即利用城市地表覆盖比例及其各自 CN 值进行加权计算得到,计算公式如下:

$$CN = f_1 \times CN_1 + f_2 \times CN_2 + f_3 \times CN_3 \quad (4)$$

式中, f_1 , f_2 和 f_3 分别代表不透水面、植被和裸土在像元内的百分比, CN , CN_1 , CN_2 , CN_3 分别代表计算得到的综合 CN 值及不透水面、植被和裸土的 CN 值,不透水面和裸土的初始 CN 值分别为 98 和 91,植被的初始 CN 值的计算方法见参考文献^[45]。土壤湿度设置为中等情景。

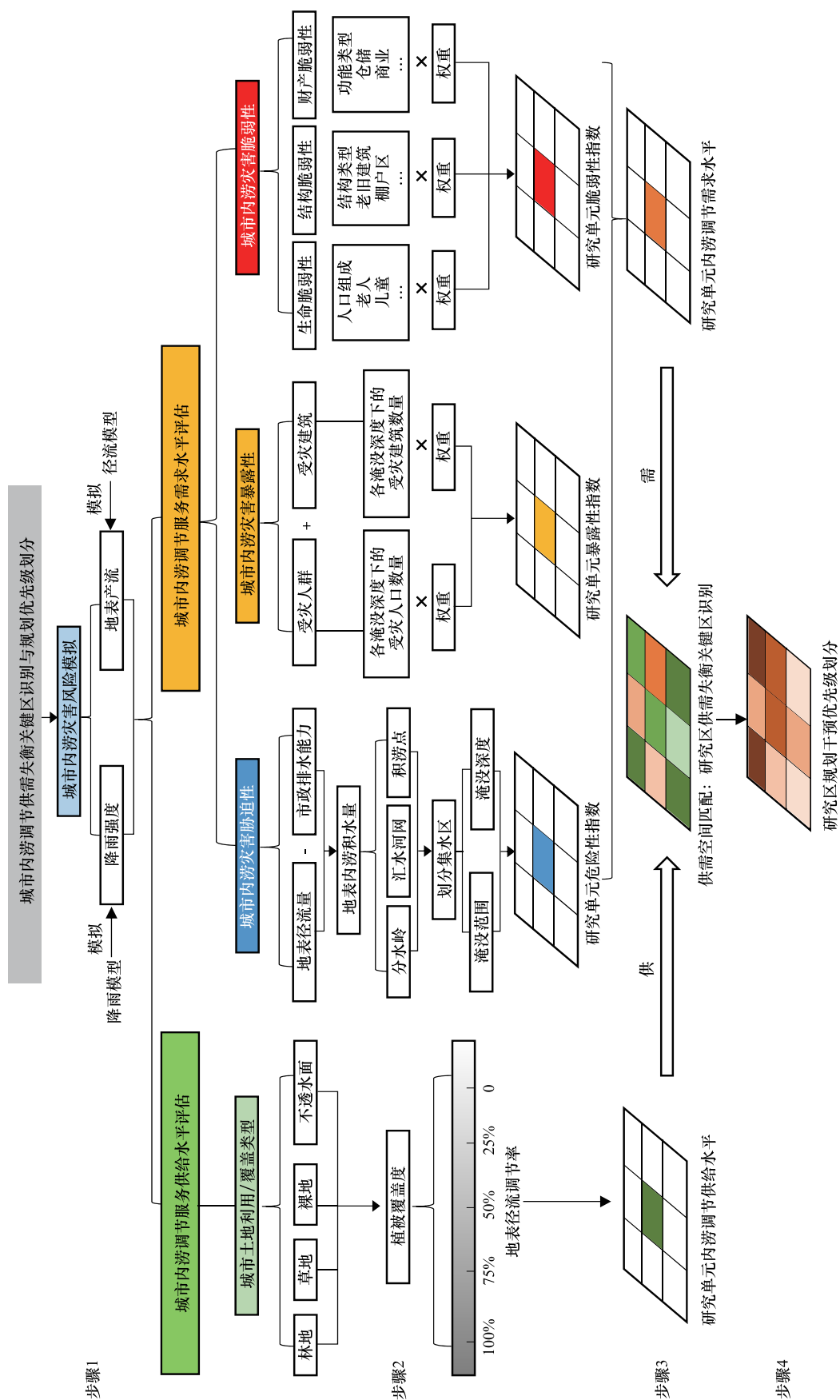


图3 指标选取与技术路线

Fig.3 Index selection and technical route

2.3.2 城市内涝调节服务供给评估

城市绿色空间通过促进地表水下渗和冠层节流等方式有效减少地表径流量和流速^[46]。本研究使用径流调节率^[27,29]来表征绿地调节地表径流的能力,以刻画城市内涝调节服务的供给能力。计算公式如下:

$$C_r = \Delta_v \times (0.001 \times P \times A)^{-1} \times 100\% \quad (5)$$

$$\Delta_v = \sum_{i=1}^n 0.001 \times (Q_i - Q_a) \times A_i \quad (6)$$

式中, C_r 是各研究单元的地表径流调节率(%); Δ_v 是像元内绿地空间的地表径流调蓄量(mm); P 是降雨量(mm); A 是各研究单元的面积(m^2)。 Q_i 是占比为 100%的不透水面产生的地表径流量(mm); Q_a 是各绿地覆盖类型实际产生的地表径流量(mm); A_i 是每个像元的面积(m^2)。径流调节率越高,表明绿地空间的内涝调节服务供给水平越高。

2.3.3 城市内涝调节服务需求评估

在内涝灾害情景下,胁迫性(Hazard)、暴露性(Exposure)和脆弱性(Vulnerability)之间的相互作用反映受灾风险程度^[47-50]。其中胁迫性指与自然灾害有关的物理事件及其影响;暴露性指在不同灾害级别中存在的人、建筑、基础设施等经济、社会和文化资产;脆弱性指受灾体承受灾害的能力^[47,51]。本研究将三者的综合影响定义为城市内涝调节服务的综合需求。

胁迫性评估。胁迫性分析需要同时考虑暴雨自然^[52]径流量和城市排水系统的排水能力两大关键因素^[53]。根据《室外排水设计规范 GB50014—2006(2016 版)》和实际情况,设定厦门岛城市排水管网的实际排涝能力为一年一遇(35.14mm/h)^[38],地表径流量减去排水量后的雨量得到内涝积水量^[53]。本研究基于 DEM 数据,运用 GIS 水文分析模块中的 D8 算法^[52,54-55],识别分水岭、汇流河网和积涝点,划分汇水分区,并求出各汇水区内的内涝积水量。计算公式如下^[56]:

$$W = (Q - V) \times S' \quad (7)$$

式中, W 是内涝积水量(mm), Q 是地表径流量(mm), V 是排水量(35.14mm/h), S' 是汇水区面积(m^2)。采用“等体积法”模拟内涝淹没范围和淹没高度,以汇水区内的内涝积水量 W 为参照,在 GIS 平台的 3D 表面体积模块中设定模拟淹没高度 H ,计算得到 3D 淹没体积 V ,当 $V = W$ 时, H 即为该汇水区的淹没高度。提取淹没高度以下的 DEM 数据,得到淹没区;淹没高度减去修正后的地形高程,得到实际淹没深度^[56]。各淹没深度范围内的受灾面积占整个研究区淹没深度范围内的受灾面积的比例之和,乘以权重系数,即为该研究单元内的内涝淹没胁迫性指数 H 。计算过程参照公式(8—9)。

暴露性评估。本研究在石勇等提出的内涝暴露性指数^[41]的基础上,构建了受灾体暴露性评价体系,重点考虑城市空间中的人及其生活、生产空间的受灾数量和受灾强度。根据《GB51222—2017 城镇内涝防治技术规范》^[57],积水深度超过 15cm 视为发生内涝。基于此,本文结合已有内涝等级划分研究^[38],将淹没深度划分为 4 个等级:15—30cm,30—45cm,45—60cm,60cm 以上;利用 GIS 统计分析每种淹没等级中,各街道单元内的受灾建筑面积和受灾人口数量占整个研究区内受灾建筑面积和受灾人口数量的比例。其次,考虑不同淹没等级对受灾体的影响程度,给 I—IV 级的内涝等级分别赋予权重:0.2,0.4,0.6,0.8^[41]。最终,各淹没等级内受灾体占比的加权和为该研究单元的暴露性指数。计算公式如下^[41]:

$$E_j = \sum_{i=1}^m g_i(u_j) \times t \quad (t = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8) \quad (8)$$

$$g_i(u_j) = \frac{f_i(u_j)}{C_i} \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

式中, E_j 是研究单元 j 的暴露性指数, t 是内涝等级的权重; $g_i(u_j)$ 是研究单元 j 中暴露等级 i 的建筑面积在整个研究区该暴露等级的总建筑面积中所占的比例; $f_i(u_j)$ 是各研究单元中每种暴露水平的受灾建筑面积, C_i 是整个研究区中每种暴露水平的总建筑面积。其中 $m = 4$, $n = 873$ 。人口暴露性与建筑暴露性的计算过程相同,两项指数的平均值为综合暴露性指数 E 。

脆弱性评估。内涝灾害所引发的脆弱性包括建筑结构损失^[58]、财产损失^[40]以及人口安全损失^[9]。由于缺少老年人、儿童等人口组成数据,本研究主要探讨建筑结构损失和财产损失两项指标。同时,内涝损失主要与积水深度有关,受水流冲击和淹没历时等因素的影响较小^[58],因此,以积水深度作为脆弱性评估的控制性指标。选取已被广泛应用的澳大利亚 ANUFLOOD 建筑结构水深-损失率曲线^[59],根据国内学者的修正经验^[40]及本研究区的建筑结构调研结果,对其进行本地化拟合修正,构建了适用于本地区的建筑结构脆弱性模型和室内财产脆弱性模型,计算公式如下:

$$v_1 = 0.041 + 0.165x - 0.033x^2 + 0.006x^3 \quad (10)$$

$$v_2 = 0.041 + 0.893x + 0.005x^2 - 0.121x^3 \quad (11)$$

式中, v_1 为建筑结构灾损率(%); v_2 为住宅建筑的室内财产灾损率(%); x 为内涝积水深度(m)。相关研究表明,内涝灾害发生时,老旧建筑的结构脆弱性更强^[41],同时,商业建筑及仓储建筑的财产脆弱性明显强于住宅建筑^[40],因此,该类建筑的灾损率需乘以权重系数 1.2。不同淹没等级中的建筑类型占比及权重参照暴露性评估过程。建筑结构脆弱性和室内财产脆弱性的平均值为综合脆弱性指数 V 。

城市内涝调节服务综合需求评估。根据灾害系统理论,胁迫性是灾害产生的先决条件,表征致灾程度;暴露性是灾害产生的直接原因,反映受灾体的受灾状态;胁迫性是灾害损失的重要条件,衡量受灾体的损失程度。三项指标共同决定了灾害风险,即反映了内涝调节服务的综合需求。计算公式如下:

$$R = H \times E \times V \quad (12)$$

式中, R 为内涝调节服务综合需求; H 为胁迫性; E 为暴露性; V 为脆弱性。

2.3.4 城市内涝调节服务供需匹配

使用 Z-score 标准化方法进行生态系统服务的供需分异,能够简洁直观的识别生态系统服务供需的匹配类型^[60-61]。基于上述研究结果,对每个研究单元内的供需水平进行 Z-score 标准化和象限划分。 x 轴表示标准化后的生态系统服务供给水平, y 轴表示标准化后的生态系统服务需求水平,划分出四个象限。第一象限为高供给高需求,第二象限为低供给高需求,第三象限为低供给低需求,第四象限为高供给低需求。Z-score 标准化公式参考文献^[60]进行。

2.3.5 规划干预优先级划分

为了进一步指导城市规划和景观设计,引入优先级指数 Priority Index (PRI)^[29]对需要进行干预的关键区域进行优先级排序。计算公式如下:

$$PRI = \frac{(H + 1) \times (E + 1) \times (V + 1)}{(C_r + 1)} \quad (13)$$

式中, H 是胁迫性指数, E 是暴露性指数, V 是脆弱性指数, C_r 是地表径流调节率。当胁迫性、暴露性和脆弱性越大,地表径流调节率越小时, PRI 越大,该地区越需要优先干预。

3 结果与分析

3.1 内涝调节服务供给能力及空间特征

模拟预测结果显示(图 4),高覆盖度的植被类型的地表径流调节率较高,表明城市绿地空间能够有效提供内涝调节服务,且林地调节能力强于草地。伴随降雨重现期变化,降雨量增大,径流深度增多,植被的径流调节率逐渐降低,与 1 年重现期相比,20 年,50 年,100 年,200 年,500 年一遇情景下的平均内涝调节服务分别下降了 15.59%、19.58%、23.32%、24.84%、27.81%,表明城市绿地所提供的内涝调节服务受降雨量的制约。

空间分布结果表明(图 5),内涝调节服务供给能力呈现“南高北低”的空间分布格局。高值区($C_r > 44.2\%$)主要集中在御屏山、狐尾山、仙岳山等高植被覆盖区。低值区($C_r < 7.14\%$)主要集中在空港物流园、象屿保税区及城市中心等不透水面覆盖区。同时, LISA 结果显示(图 5),在 95% 的置信区间内,供给量的 Moran's I 指数为 0.525,表明在街道尺度的内涝调节服务供给水平具有明显的空间集聚特征。高-高热点区集中于南部和西部片区,低-低冷点区集中于西北部和中部片区。

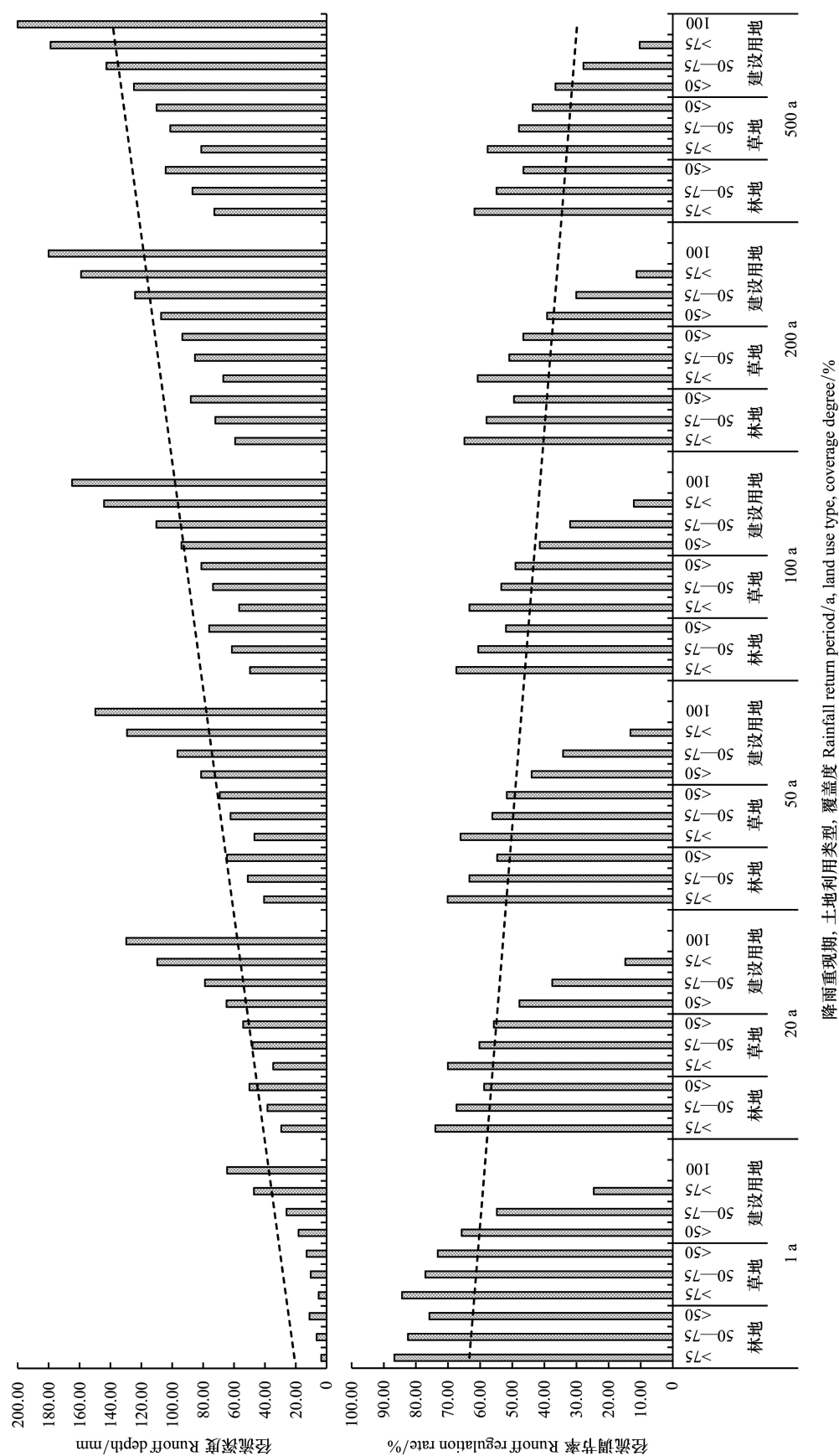


图 4 不同降雨重现期内涝调节服务的供给能力
Fig.4 The supply capacity of waterlogging regulation service in different rainfall return periods

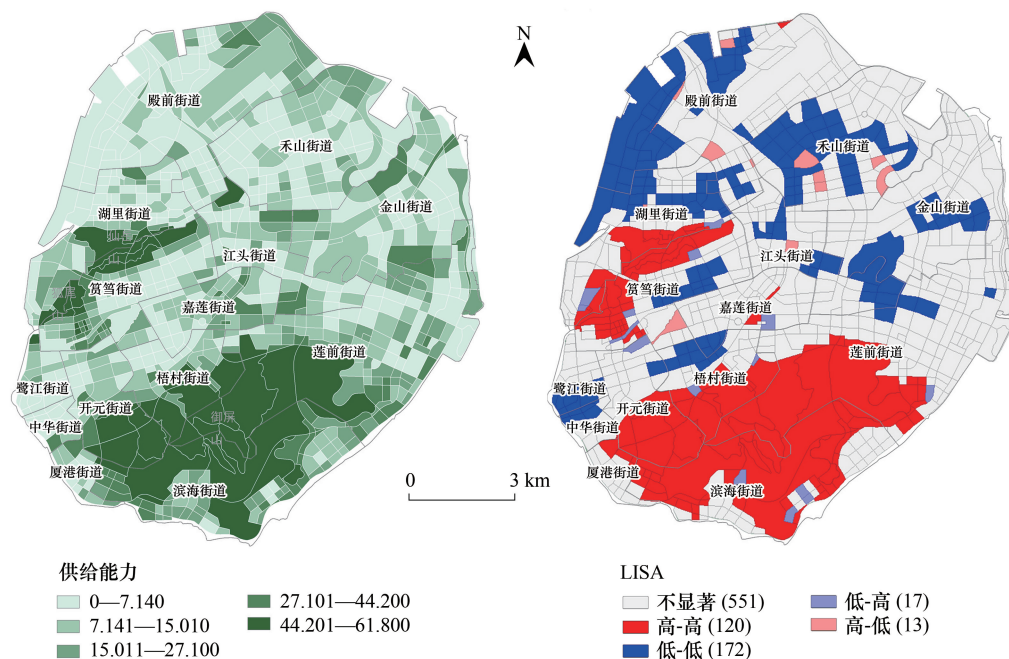


图5 内涝调节服务供给能力空间分布图及 LISA 分布

Fig.5 Spatial distribution and LISA distribution of the supply capacity of waterlogging regulation services

3.2 内涝调节服务需求水平及空间特征

基于分水岭、汇流河网和积涝点,将研究区划分为 28 个汇水区(图 1)。根据径流量和城市排水管网的排涝能力,采用“等体积法”模拟出内涝淹没范围和淹没等级(图 6)。经验证,研究结果符合城市内涝历史规律并与已有研究结果相契合^[38,62]。以此为基础,通过分析内涝灾害的胁迫性、受灾体的暴露性和脆弱性,得到内涝调节服务的需求水平。

内涝调节需求结果表明(图 7),厦门岛内涝调节服务需求水平呈现“周边高中部低”且“北高南低”的空间格局。高需求区($R > 0.55\%$)主要集中在象屿保税区片区、筓筓湖片区、五缘湾片区、湖边水库片区和会展中心片区,最大需求指数达:14.94%。同时,LISA 结果显示(图 7),在 95%的置信区间内,内涝调节需求的 Moran's I 指数为 0.384,表明在街道尺度的内涝调节服务需求水平具有明显的空间集聚特征,高-高热点区主要分布于北部沿海地区,低-低冷点区主要分布于中部和南部地区。

3.3 内涝调节服务供需空间匹配

基于 Z-score 标准化后的城市内涝调节服务供需象限分布结果表明(图 8),有 114 个研究单元处于低供-高需状态,29 个研究单元处于高供-高需状态。同时,城市内涝调节服务供需空间匹配结果显示(图 8),处于低供-高需状态的关键区主要分布于象屿保税区、空港物流园、五缘湾片区、湖边水库片区、筓筓湖片区和会展

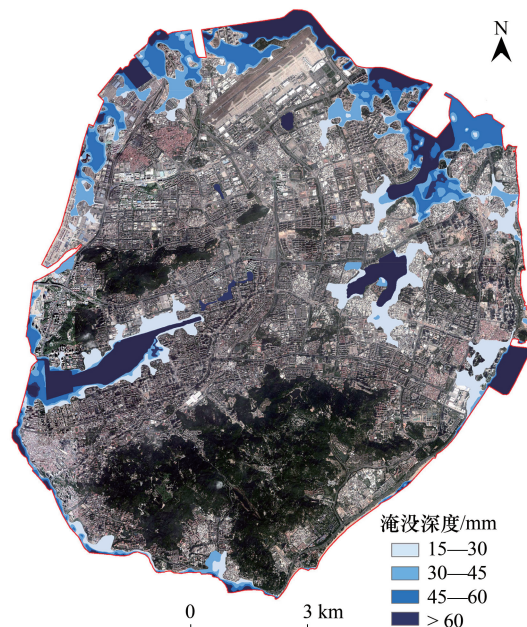


图6 内涝灾害淹没范围及淹没深度

Fig.6 Inundation range and depth of waterlogging disaster

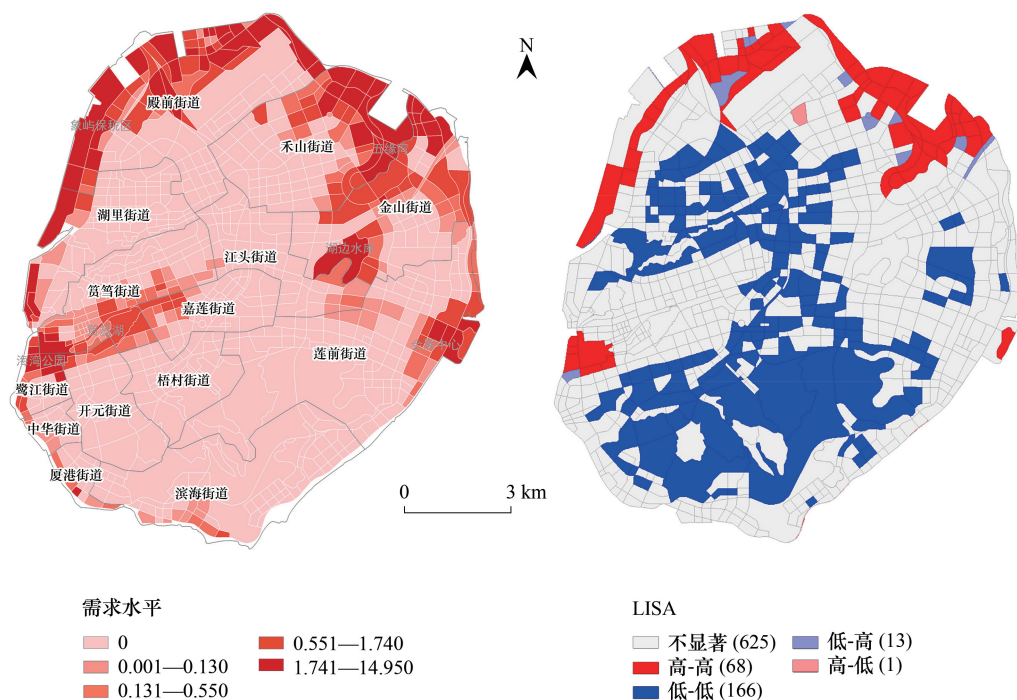


图 7 内涝调节服务需求空间分布及 LISA 分布图

Fig.7 Spatial distribution and LISA distribution of the demand capacity of waterlogging regulation services

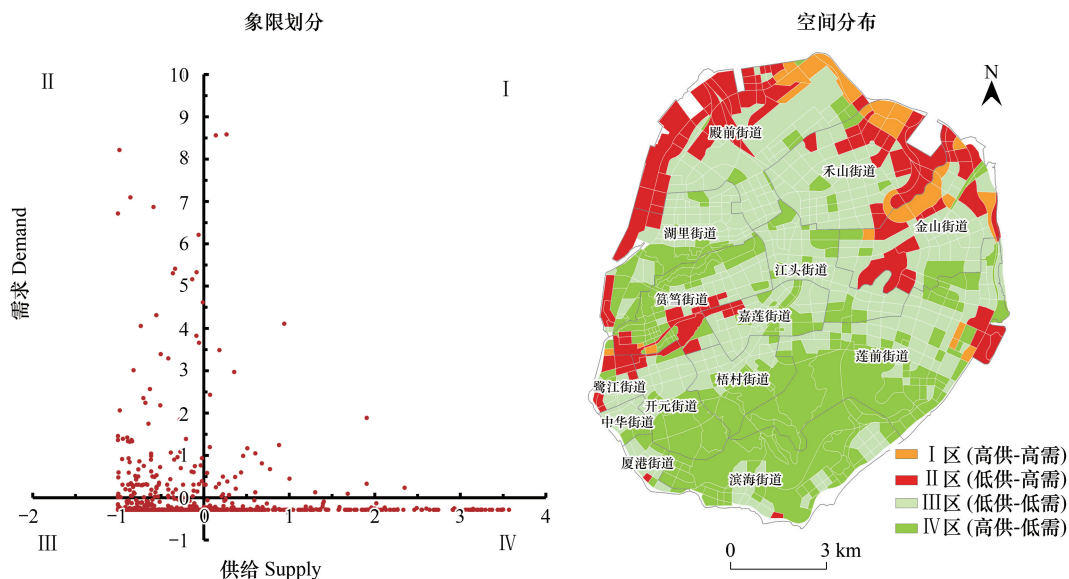


图 8 内涝调节服务供需匹配及空间分布

Fig.8 Quadrant division and spatial distribution of waterlogging regulation service supply and demand matching

中心片区。处于高供-低需状态的研究单元主要分布于御屏山、狐尾山、仙岳山片区。

3.4 规划干预优先级划分

使用优先级指数 (PRI) 在供需象限划分的基础上进一步揭示供需失衡的程度, 从而准确划分优先干预的次序^[29]。根据优先级指数, 将优先干预区划分为 5 个等级, 级别越高, 越需要优先干预。结果表明 (图 9), 厦门岛的内涝调节服务优先干预区空间分布差异明显。优先级为 V 级的区域主要集中于空港物流园和象屿保

税区的沿海地区;优先级为Ⅳ级的区域主要集中于筓筓湖下游片区、五缘湾片区、湖边水库片区和会展中心片区;优先级为Ⅲ—Ⅱ级的区域主要集中于筓筓湖上游和五缘湾东、西部片区。

4 结论与讨论

4.1 结论

本文以厦门岛为研究区域,基于遥感数据和人口、社会、经济数据,着眼于城市街区尺度,模拟了降雨强度和地表径流,评估了城市内涝调节服务的供需水平和空间分布特征,通过供需匹配识别了供需失衡关键区,并划分了规划干预优先级。研究表明:(1)城市绿地能够有效提供内涝调节服务,且林地调节能力强于草地;服务供给能力呈现“南高北低”的分布特点,且空间集聚特征明显。高供给区主要集中于御屏山、狐尾山和仙岳山片区。(2)淹没范围与淹没深度,人口数量与建筑数量,建筑质量与建筑功能共同决定内涝调节服务需求;服务需求水平呈现“周边低中部低”且“北高南低”的分布特点,同样具有明显的空间集聚特征。高值区主要集中在象屿保税区片区、筓筓湖片区、五缘湾片区、湖边水库片区和会展中心片区。(3)各研究单元的供需匹配差异明显,其中有 114 个研究单元处于低供-高需失衡状态,主要集中于中北部片区。(4)规划干预优先级较高的区域主要集中于空港物流园、象屿保税区和五缘湾片区。以上关键区及优先干预区是需要未来城市规划和景观设计过程重点优化的对象。

4.2 讨论

研究从供需视角探讨解决城市内涝风险问题,为促进以人为核心的城市发展目标提供了新的视角和启示:

(1)胁迫性、暴露性和脆弱性对于评估内涝调节服务需求的现实意义。在同样的淹没深度下,部分地区的人口分布广、建筑密度大,建筑结构脆弱,生命财产损失极大;而部分地区则以公园绿地为主,生命财产损失极小。因此,内涝淹没范围和淹没深度仅能表征内涝灾害的客观胁迫性要素,而暴露性和脆弱性则进一步考虑了人口、社会、经济等方面的城市发展要素,三项指标共同反映了城市居民对内涝调节服务的实际需求。

(2)供需匹配对于识别关键区的关键作用。研究发现,城市内涝调节服务供给和需求存在明显的空间异质性和空间错位特征,因此,单方面考虑城市内涝的供给能力或需求水平,在城市内涝灾害防控过程中均存在局限性。通过供需匹配可以更加精准、全面地认知研究单元的生态安全状态,从而为制定具有针对性的规划策略提供科学依据。例如对于高供-低需失衡关键区,要应在保护生态本底的基础上合理利用,以提升生态系统服务效益。对于低供-高需失衡关键区,应加强绿色基础设施布局与生态补偿,以提高内涝调节的供给能力;同时要优化市政排水设施布局,控制人口分布与开发强度,调整产业功能布局,以降低内涝调节的需求水平,从而减少内涝灾害造成的人身安全及社会经济损失。

(3)划分规划干预优先级的实践价值。解决城市问题需要系统规划,突出重点,分期实施,尤其在土地资源非常紧缺的中心城市。相较于现有规划^[63],本文所划分的规划干预优先级在内涝积水风险识别的基础上做出了进一步探索,在优化重点、建设时序及资金投入等方面提供了有力支持,从而有助于保障城市内涝安全和经济社会可持续发展。

(4)降低城市内涝灾害风险的重要途径。提高城市韧性,降低城市内涝灾害风险,应重点关注供需失衡

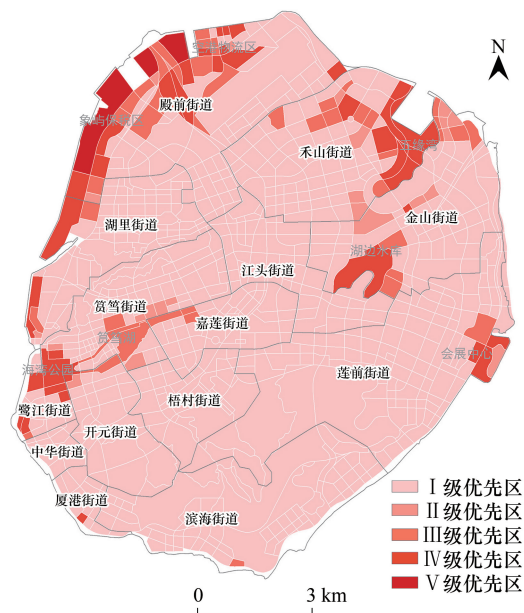


图9 规划干预优先级划分

Fig.9 Prioritize planning interventions

关键区及规划干预优先级。一方面要控制需求端的指标因子,如人口数量,建筑量,不透水面比例,另一方面要优化供给端的指标因子,如绿地数量、质量和分布格局。同时,还要关注积涝区上游的内涝径流状态,增加生态用地面积,优化绿地景观配置,减缓上游径流量和径流速度,从而构建从源头、过程到汇点的城市生态网络系统。

需要说明的是,本文深度剖析内涝调节服务的供需关系,旨在降低城市内涝灾害风险。后续研究可以进一步探索景观数量、结构及格局对城市内涝调节服务的驱动机制,从而为落实优化方案提供更加具体的理论依据。

参考文献 (References):

- [1] Hirabayashi Y, Mahendran R, Koirala S, Konoshima L, Yamazaki D, Watanabe S, Kim H, Kanae S. Global flood risk under climate change. *Nature Climate Change*, 2013, 3(9): 816-821.
- [2] 国家统计局. 中华人民共和国 2020 年国民经济和社会发展统计公报. (2021-02-28) [2021-03-08]. http://www.stats.gov.cn/zjtj/zthd/lhfw/2021/lh_hgjj/202103/t20210301_1814216.html.
- [3] 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.
- [4] Wu Y, Tao Y, Yang G S, Ou W X, Pueppke S, Sun X, Chen G T, Tao Q. Impact of land use change on multiple ecosystem services in the rapidly urbanizing Kunshan City of China: past trajectories and future projections. *Land Use Policy*, 2019, 85: 419-427.
- [5] 景永才, 陈利顶, 孙然好. 基于生态系统服务供需的城市群生态安全格局构建框架. *生态学报*, 2018, 38(12): 4121-4131.
- [6] Bertilsson L, Wiklund K, de Moura Tebaldi I, Rezende O M, Veról A P, Miguez M G. Urban flood resilience-A multi-criteria index to integrate flood resilience into urban planning. *Journal of Hydrology*, 2019, 573: 970-982.
- [7] 李德师, 徐连军, 陶涛, 信昆仑. 山地丘陵城市汇水区划分方法及内涝模拟分析. *中国给水排水*, 2021, 37(1): 109-113.
- [8] 赵丽元, 韦佳伶. 城市建设对暴雨内涝空间分布的影响研究——以武汉市主城区为例. *地理科学进展*, 2020, 39(11): 1898-1908.
- [9] 吴雪飞, 谭传东. 武汉中心城区生态系统服务额外需求量化评估——缘起绿色基础设施供需错配. *中国园林*, 2020, 36(5): 127-132.
- [10] Martín-López B, Gómez-Baggethun E, García-Llorente M, Montes C. Trade-offs across value-domains in ecosystem services assessment. *Ecological Indicators*, 2014, 37: 220-228.
- [11] Burkhard B, Kroll F, Nedkov S, Müller F. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets. *Ecological Indicators*, 2012, 21: 17-29.
- [12] Bennett E M, Cramer W, Begossi A, Cundill G, Díaz S, Egoh B N, Geijzenborgh I R, Krug C B, Lavorel S, Lazos E, Lebel L, Martín-López B, Meyfroidt P, Mooney H A, Nel J L, Pascual U, Payet K, Harguindeguy N P, Peterson G D, Prieur-Richard A H, Reyers B, Roebeling P, Seppelt R, Solan M, Tschakert P, Tschamke T, Turner I B L, Verburg P H, Viglizzo E F, White P C L, Woodward G. Linking biodiversity, ecosystem services, and human well-being: three challenges for designing research for sustainability. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2015, 14: 76-85.
- [13] Sun S, Zhai J Q, Li Y, Huang D P, Wang G F. Urban waterlogging risk assessment in well-developed region of Eastern China. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2020, 115: 102824.
- [14] Quan R S. Rainstorm waterlogging risk assessment in central urban area of Shanghai based on multiple scenario simulation. *Natural Hazards*, 2014, 73(3): 1569-1585.
- [15] 徐美, 刘舒, 孙杨, 姚永慧. 利用洪涝模型进行城市内涝风险快速识别与预警. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2020, 45(8): 1185-1194.
- [16] 谢映霞. 从城市内涝灾害频发看排水规划的发展趋势. *城市规划*, 2013, 37(2): 45-50.
- [17] 车伍, 杨正, 赵杨, 李俊奇. 中国城市内涝防治与大小排水系统分析. *中国给水排水*, 2013, 29(16): 13-19.
- [18] 景学义, 刘宇飞, 王永波, 沈彦燕, 张少锋, 陶国辉. 哈尔滨市城市内涝监测预警系统建设. *灾害学*, 2009, 24(1): 54-57.
- [19] 姜仁贵, 王小杰, 解建仓, 张永进, 梁骥超. 城市内涝应急预案管理研究与应用. *灾害学*, 2018, 33(2): 146-150.
- [20] 严正宵, 夏军, 宋进喜, 赵玲玲, 庞国伟. 中小流域设计暴雨雨型研究进展. *地理科学进展*, 2020, 39(07): 1224-1235.
- [21] 中华人民共和国建设部. GB 50014—2006 室外排水设计规范 (2016 年版). 北京: 中国计划出版社, 2016: 1-16.
- [22] 吴志峰, 象伟宁. 从城市生态系统整体性、复杂性和多样性的视角透视城市内涝. *生态学报*, 2016, 36(16): 4955-4957.
- [23] 荣月静, 严岩, 王辰星, 章文, 朱婕缘, 卢慧婷, 郑天晨. 基于生态系统服务供需的雄安新区生态网络构建与优化. *生态学报*, 2020, 40(20): 7197-7206.
- [24] 刘立程, 刘春芳, 王川, 李鹏杰. 黄土丘陵区生态系统服务供需匹配研究——以兰州市为例. *地理学报*, 2019, 74(9): 1921-1937.
- [25] Woodruff S C, Bendor T K. Ecosystem services in urban planning: comparative paradigms and guidelines for high quality plans. *Landscape and Urban Planning*, 2016, 152: 90-100.
- [26] Yu H F, Zhao Y L, Fu Y C. Optimization of impervious surface space layout for prevention of urban rainstorm waterlogging: a case study of Guangzhou, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(19): 3613.
- [27] 李孝永, 匡文慧. 北京城市土地利用/覆盖变化及其对雨洪调节服务的影响. *生态学报*, 2020, 40(16): 5525-5533.
- [28] Meerow S, Newell J P. Spatial planning for multifunctional green infrastructure: growing resilience in Detroit. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 159: 62-75.
- [29] Maragno D, Gaglio M, Robbi M, Appiotti F, Fano E A, Gissi E. Fine-scale analysis of urban flooding reduction from green infrastructure: An ecosystem services approach for the management of water flows. *Ecological Modelling*, 2018, 386: 1-10.

- [30] 李锋, 王如松, 赵丹. 基于生态系统服务的城市生态基础设施: 现状、问题与展望. 生态学报, 2014, 34(1): 190-200.
- [31] 肖华斌, 施俊婕, 盛硕, 刘莹. 生态系统服务优化导向下城市绿色基础设施构建研究——以济南市西部新城为例. 上海城市规划, 2019, 1(1): 45-50.
- [32] 顾康康, 程帆, 杨倩倩. 基于 GIS 模型的城市绿色基础设施多功能性评估. 生态学报, 2018, 38(19): 7113-7119.
- [33] 许超, 孟楠, 逯非, 刘晓明, 欧阳志云. 生态系统服务需求视角下的澳门城市绿色基础设施管理研究. 中国园林, 2020, 36(9): 104-109.
- [34] 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.
- [35] 焦胜, 马伯, 黎贝. 中国城市内涝成因和防控策略研究进展. 生态经济, 2019, 35(7): 92-97.
- [36] 周宏, 刘俊, 高成, 欧淑芳. 我国城市内涝防治现状及问题分析. 灾害学, 2018, 33(3): 147-151.
- [37] 吴文菁, 陈佳颖, 叶润宇, 李杨帆. 台风灾害下海岸带城市社会-生态系统脆弱性评估——大数据视角. 生态学报, 2019, 39(19): 7079-7086.
- [38] 刘家宏, 李泽锦, 梅超, 王开博, 周冠南. 基于 TELEMAC-2D 的不同设计暴雨下厦门岛城市内涝特征分析. 科学通报, 2019, 64(19): 2055-2066.
- [39] Schirpke U, Candiago S, Vigl L E, Jäger H, Labadini A, Marsoner T, Meisch C, Tasser E, Tappeiner U. Integrating supply, flow and demand to enhance the understanding of interactions among multiple ecosystem services. Science of the Total Environment, 2019, 651: 928-941.
- [40] 权瑞松. 基于情景模拟的上海中心城区建筑暴雨内涝脆弱性分析. 地理学报, 2014, 34(11): 1399-1403.
- [41] 石勇, 许世远, 石纯, 孙阿丽, 赵庆良. 基于情景模拟的上海中心城区居民住宅的暴雨内涝风险评价. 自然灾害学报, 2011, 20(3): 177-182.
- [42] 要志鑫, 孟庆岩, 孙震辉, 柳树福, 张琳琳. 不透水面与地表径流时空相关性研究——以杭州市主城区为例. 遥感学报, 2020, 24(2): 182-198.
- [43] Yao L, Chen L D, Wei W, Sun R H. Potential reduction in urban runoff by green spaces in Beijing: a scenario analysis. Urban Forestry & Urban Greening, 2015, 14(2): 300-308.
- [44] 姚磊, 卫伟, 于洋, 肖峻, 陈利顶. 基于 GIS 和 RS 技术的北京市功能区产流风险分析. 地理学报, 2015, 70(2): 308-318.
- [45] Fan F L, Deng Y B, Hu X F, Weng Q H. Estimating composite curve number using an improved SCS-CN method with remotely sensed variables in guangzhou, China. Remote Sensing, 2013, 5(3): 1425.
- [46] Gill S E, Handley J F, Ennos A R, Result S. Adapting cities for climate change: the role of the green infrastructure. Built Environment, 2007, 33(1): 115-133.
- [47] IPCC. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [48] Lindley S J, Handley J F, Theuray N, Peet E, Mcevoy D. Adaptation strategies for climate change in the urban environment: assessing climate change related risk in UK urban areas. Journal of Risk Research, 2006, 9(5): 543-568.
- [49] Crichton D. What can cities do to increase resilience?. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2007, 365(1860): 2731-2739.
- [50] Kaźmierczak A, Cavan G. Surface water flooding risk to urban communities: analysis of vulnerability, hazard and exposure. Landscape and Urban Planning, 2011, 103(2): 185-197.
- [51] Kellermann P, Schröter K, Thieken A H, Haubrock S N. The object-specific flood damage database HOWAS 21. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2020, 20(9): 2503-2519.
- [52] 薛丰昌, 黄敏敏, 唐步兴, 钱洪亮, 耿焕同. 三维 GIS 的城市暴雨积涝灾害模拟. 测绘科学, 2017, 42(2): 53-58, 64-64.
- [53] 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.
- [54] 刘兴坡, 于腾飞, 李永战, 胡小婷, 丁永生. 基于遥感图像的汇水区域综合径流系数获取方法. 中国给水排水, 2016, 32(9): 140-143.
- [55] 石赟赟, 万东辉, 陈黎, 郑江丽. 基于 GIS 和 SWMM 的城市暴雨内涝淹没模拟分析. 水电能源科学, 2014, 32(6): 57-60, 12-12.
- [56] 尹占娥, 暴雨杰, 殷杰. 基于 GIS 的上海浦东暴雨内涝灾害脆弱性研究. 自然灾害学报, 2011, 20(2): 29-35.
- [57] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 51222—2017 城镇内涝防治技术规范. 北京: 中国计划出版社, 2017.
- [58] 尹占娥, 许世远, 殷杰, 王军. 基于小尺度的城市暴雨内涝灾害情景模拟与风险评估. 地理学报, 2010, 65(5): 553-562.
- [59] Australia E M. Disaster loss assessment guidelines. Sydney: Paragon Printer Australasia Pty Ltd, 2002: 31-54.
- [60] Wang J, Zhai T L, Lin Y F, Long X S, He T. Spatial imbalance and changes in supply and demand of ecosystem services in China. Science of the Total Environment, 2019, 657: 781-791.
- [61] 黄智洵, 王飞飞, 曹文志. 耦合生态系统服务供求关系的生态安全格局动态分析——以闽三角城市群为例. 生态学报, 2018, 38(12): 4327-4340.
- [62] 薛丰昌, 张嫣然, 田娟, 赵碧, 朱一晗. 厦门岛内涝灾害风险评价制图. 图学学报, 2019, 40(2): 321-327.
- [63] 厦门市市政园林局. 厦门市排水(雨水)防涝专项规划(2020—2035 年). (2020-10-15). http://szy1.xm.gov.cn/xxgk/zfxxgkml/xzsk/202011/t20201130_2499714.htm.