

南宁市设计降雨及其总量控制率时空异质性特征

马秘¹, 杨云川^{1,2,3,4}, 黎倩云¹, 周津羽¹, 韦姣崙¹, 廖丽萍^{1,2,3,4}, 韦钧培¹

(1. 广西大学 土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004; 2. 广西岩溶区水安全与智慧调控工程研究中心, 广西 南宁 530004; 3. 广西大学 工程防灾与结构安全教育部重点实验室, 广西 南宁 530004; 4. 广西防灾减灾与工程安全重点实验室, 广西 南宁 530004)

摘要: 针对当前我国海绵城市建设及成效考核中设计降雨及其控制率指标单一均化、难以有效定量指导不同下垫面 LID 设施建设并评价其效果等问题,以南宁市市区为例,基于 2020 年 Quick Bird 土地利用及子流域精细划分,根据 1981-2010 年南宁市 0.1°CMFD 格点日降雨序列资料,采用 ArcGIS 空间插值法、《指南》中设计降雨量与控制率关系法以及容积法,分析了研究区日降雨量、设计降雨量及其总量控制率的时空异质性特征,并讨论了现状下垫面调蓄及管网排水对控制率指标的定量影响。结果表明:南宁市市区日降雨频次、年分配、设计降雨量及其控制率均具有显著的时空异质性特征,按 75% 控制率对应各月的日设计降雨量变化范围为 9.72(2 月)~32.05 mm(7 月);南宁市主城区(面积占比 31.99%)现状年降雨总量控制率普遍低于 50%,仅靠绿色 LID 设施难以实现 75% 控制率目标,要实现该控制率目标,主城区还需增加调蓄容积 120~211 m³/hm²,若考虑管网排水能力 70~103 m³/hm²,则所需调蓄容积可减少 30~108 m³/hm²。综上,为实现南宁市 75% 控制率目标,应针对现状下垫面水平,建立考虑时空异质性的不同控制率目标与调蓄容积、管网排水之间的定量函数关系,这是有效提升海绵城市调控雨洪径流能力的一个主要途径。

关键词: 海绵城市; 设计降雨; 年降雨总量控制率; 时空异质性; 调蓄容积; 南宁市

中图分类号:TV213.9; TU992

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2022)02-0035-10

Spatio-temporal heterogeneity of the design rainfall and its total amount control rate in Nanning City

MA Mi¹, YANG Yunchuan^{1,2,3,4}, LI Qianyun¹, ZHOU Jinyu¹, WEI Jiaoyin¹,
LIAO Liping^{1,2,3,4}, WEI Junpei¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. Engineering Research Center of Water Security and Intelligent Regulation in Karst Area, Nanning 530004, China; 3. Key Laboratory of Engineering Disaster Prevention and Structural Safety of Ministry of Education, Guangxi University, Nanning 530004, China; 4. Guangxi Provincial Key Laboratory of Disaster Prevention and Engineering Safety, Nanning 530004, China)

Abstract: The single and unified design rainfall and its control rate indicator are conventionally adopted in the construction and effectiveness evaluation of sponge city in China, which makes it difficult to effectively guide and evaluate the construction of different LID facilities on the underlying surface. In view of this problem, we analyzed the spatio-temporal heterogeneity characteristics of daily rainfall, design rainfall and its control rate, and discussed the quantitative influence of the current underlying surface storage and pipe network drainage on the control rate indicator in Nanning urban area using ArcGIS spatial interpolation, design rainfall and control rate relationship method and volume method, based on Quick Bird land use, the fine division of sub-basins in 2020 and the Nanning 0.1° CMFD grid daily rainfall series from 1981 to 2010. The results show that the daily rainfall frequency, annual distribution, design rainfall and its control rate of Nanning urban area all showed significant spatial and temporal heterogeneity. The

收稿日期:2021-07-19; 修回日期:2021-11-12

基金项目:国家自然科学基金项目(51609041/41901132); 广西自然科学基金项目(2019GXNSFAA185015)

作者简介:马秘(1998-),女,新疆温宿人,硕士研究生,主要从事海绵城市雨洪模拟与调控研究。

通讯作者:杨云川(1982-),男,宁夏中宁人,博士(后),副教授,硕士生导师,主要从事农业与城市生态水文学研究。

variation range of design rainfall of each month corresponding to 75% control rate was 9.72 (February) – 32.05 mm/24h (July); however, the current annual total rainfall control rate of Nanning main urban area (area ratio: 31.99%) is generally less than 50%, and it is difficult to achieve the target of 75% control rate only by the contribution of green LID facilities. To obtain the 75% control rate, it is suggested that the storage capacity of the main urban area should be in the range of 120 – 211 m³/hm²; however, the required storage capacity can be reduced to 30 – 108 m³/hm² if the drainage capacity of the pipeline network reaches 70 – 103 m³/hm². In conclusion, in order to achieve the target of 75% control rate of Nanning City, the quantitative function relationship of different control rate targets considering the temporal and spatial differentiation, storage capacity and drainage of pipe network should be established according to the current underlying surface level, which is a main way to effectively improve the rainfall runoff control capacity of sponge city.

Key words: sponge city; design rainfall; annual total rainfall control rate; spatial and temporal heterogeneity; storage capacity; Nanning City

1 研究背景

针对快速城市化过程中出现的雨洪内涝、水体黑臭、水资源短缺等突出城市水问题,我国于2013年12月正式提出“海绵城市”建设举措,旨在实现城市雨洪的有效综合管理^[1-2]及其生态系统服务功能的可持续提升^[3],并先后遴选了两批共30个海绵城市建设试点城市,试点建设范围最大的是上海市,建设面积为79 km²,其次为南宁市,建设面积为60.2 km²。历经7年科学研究和建设实践证明,我国现有海绵城市建设对城市区域的径流峰量、污染物、利用率等均具有不同程度的调控效果,可谓初见成效^[4-6];但也暴露了其对1 a及以上重现期暴雨产生的径流只能实现部分控制^[7-8],因而众多城市暴雨内涝依然频发。由此引发了社会各界反思^[9-10],凸显了我国海绵城市建设中对考虑城市微气象循环、下垫面及管网因素的城市水文学机理的认识和应用不足^[11-13],这就需要以海绵城市系统为顶层设计,识别系统流域范围并逐级细化子流域及汇水分区,进而揭示各分区水文过程及其相互作用机理、量化海绵设施对雨洪的“渗、滞、蓄、净、用、排”综合效果^[1,10]。鉴于城市降雨及下垫面径流系数的高度非均匀性,分析海绵城市的设计降雨及其径流总量控制率时空异质特征,评估不同时段、不同分区的径流量控制率水平,是有效指导我国海绵城市建设的一个首要科学问题。

我国现行海绵城市建设主要依据《海绵城市建设技术指南:低影响开发雨水系统构建(试行)》^[14](以下简称《指南》)和《海绵城市建设绩效评价与考核办法(试行)》^[15]执行,广泛采用“年径流总量控制率”分析设计降雨及其径流量调控问题,而在《海

绵城市建设评价标准》(GB/T 51345—2018)^[16](以下简称《标准》)中将该指标改为“雨水年径流总量控制率”,这也进一步明确了该径流量控制率实际为“年降雨总量控制率”。按《指南》所述,一方面,与设计降雨对应的径流总量控制率是多年平均值,且根据单个气象站点日降雨量计算所得,而由于城市降雨的时空非均匀性^[17],并非每年乃至每月、也并非城市的每个区域都能满足该目标^[8,18-20];另一方面,随着城市化及海绵城市建设的推进,其下垫面土地利用不断变化,即海绵城市的径流系数具有时变和空间非均匀的显著特征^[9,20-21],因而《指南》中的径流量控制率指标不具备评估海绵城市建设水平及识别与目标值的差距的功能,即不能有效指导海绵城市建设的有效推进和体现空间非均匀性。此外,《指南》中定义该径流量控制率指标为“不外排”的降雨总量控制率^[20],而为满足考核目标值,浙江省、重庆市等已将外降雨水量也纳入该指标范畴^[22-23],而事实上,设计控制的雨量并非期望控制不外排的径流量,因此,该指标中是否考虑外排也是一个值得探讨的问题。

针对上述问题,本文以第一批试点建设的南宁市为例,基于海绵城市规划建设的总体范围,识别海绵城市系统的流域范围并进行逐级细化子流域及汇水分区,根据研究区精细化土地利用计算各分区综合径流系数,分析降雨时空变异性,并重点探讨了南宁市设计降雨及其总量控制率时空异质性特征、现状下垫面调蓄及管网排水对年降雨总量控制率的影响。该研究旨在构建设计降雨-径流系数-下垫面调蓄及管网排水-降雨总量控制率之间的多情景组合函数关系,为有效指导和推进海绵城市建设提供科学支撑。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

南宁市位于北回归线以南,属亚热带湿润季风气候,终年辐射强,夏长高温多雨、冬短温暖干燥;多年平均气温为 21.6 °C,多年平均降雨量为 1 298.8 mm,最大年降雨量为 1 970.1 mm,最小年降雨量为 952.9 mm,多年平均蒸发量为 1 264.3 mm。南宁市地形属于以河谷为中心的盆地,盆地向东开口,西、南、北三面均为山地围绕,地貌分为平地、低山、石山、丘陵、台地 5 种类型,其中平地占主要部分。近 20 余年来,南宁城市化发展迅猛^[24],建设用地从 1995 年的 94.33 km² 增加到 2020 年的 437.41 km²;而相应的水利工程设施滞后、城市洪涝、水环境恶化、水资源利用率低等问题日益突出。为此,“绿城”南宁市于 2010 年提出了“中国水城”建设规划(2012-2020 年)^[25],整体水系结构为“一江、两库、两渠;六环、十八河、一百湖”,即以邕江水系为主轴核心,通过老口和邕宁梯级水库提供内河补水,对 18 条城市内河进行水系环境综合整治;又于 2015 年 5 月启动海绵城市试点建设,总体构建了城市自然生态空间格局和海绵功能分区,并制定了海绵城市建设的总体策略,总面积约为 870 km²(图 1)^[24]。但其试点落地建设示范区仅为 60.2 km²(不足整个南宁市市辖范围的 1/10),年降雨总量控制率按 75% 执行,其对应的日设计降雨量仅为 27.9 mm^[15],小于 0.25 年一遇的设计暴雨强度 34.9 mm/h,更小于 1 年一遇的设计暴雨强度 50.7 mm/h,与该城市雨洪内涝防治标准要求提高到 20 年一遇^[26]的相应设计暴雨强度 84.7 mm/h 相差甚远,市区雨洪内涝每年频繁发生即是必然现象。

针对上述南宁市市区雨洪内涝及我国海绵城市建设普遍缺乏反映城市水文学机理的总体流域范围顶层设计问题^[1,10,27],本文基于 30 m DEM(digital elevation model)和 2.23 m 空间分辨率的 Quick Bird 谷歌高清影像解译的土地利用分类数据,借助 SWAT(soil and water assessment tool)中的 Watershed Delineator 功能及现场调查修正,最终获得南宁市海绵城市建设的流域研究范围总面积为 1 322.69 km²,高程范围为 41~467 m。南宁市市区流域范围高程、水系及 CMFD 降雨格点(18 个)如图 1 所示。

2.2 数据来源

本文中采用的 30 m DEM 数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>);研究区 2020 年土

地利用数据来源于 SXEARTH_pro4.6.1 软件下载的 Quick Bird 遥感影像,其空间分辨率为 2.23 m;降雨数据来源于中国科学院青藏高原研究所开发的中国区域地面气象要素数据集(China Meteorological Forcing Dataset, CMFD;<http://tpdc.ac.cn>),该数据集是一套近地面气象与环境要素综合的再分析数据^[28];通过 Python 编程批量提取研究区 1981-2010 年 18 个 0.1°×0.1°格点的逐日降雨,同时采用南宁市气象站的同时段逐日降雨对其进行校正(来源于中国气象局气象数据中心 <http://data.cma.cn/>)。研究中为便于计算与分析,所有数据统一重投影至 WGS 1984 UTM 48N 坐标系。

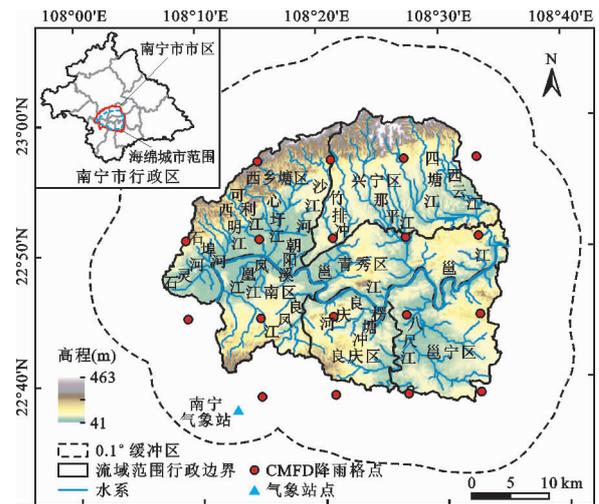


图 1 南宁市市区流域范围高程、水系及 CMFD 降雨格点(18 个)示意图

2.3 研究方法

2.3.1 研究区土地利用分类 采用 ENVI5.3 软件提取南宁市市区流域范围 2020 年的 Quick Bird 遥感影像并进行裁剪、拼接和分类,将研究区土地利用类型划分为林地、草地、耕地、建筑用地、水域以及未利用地 6 类,同时借助谷歌地球高清影像对错分的地区进行修正,最终的土地利用分类结果见图 2(a),分类精度为 91.83%。

2.3.2 研究区子流域划分 基于 30 m DEM 和水系数据,首先借助 Arc SWAT 的 Watershed Delineator 工具将研究区划分为 17 个一级子流域(如图 2(b)所示);由于《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)^[29]指出城市区域面积大于 2~5 km² 时应该考虑降雨的空间非均匀性,为了更好地表达研究区设计降雨量、径流系数等要素的空间异质性,又将一级流域进一步细化为 294 个二级子流域(如图 2(c)所示)。在上述子流域划分中,均结合土地利用的蓝、绿、灰景观格局及行政区划等因素综合修正。

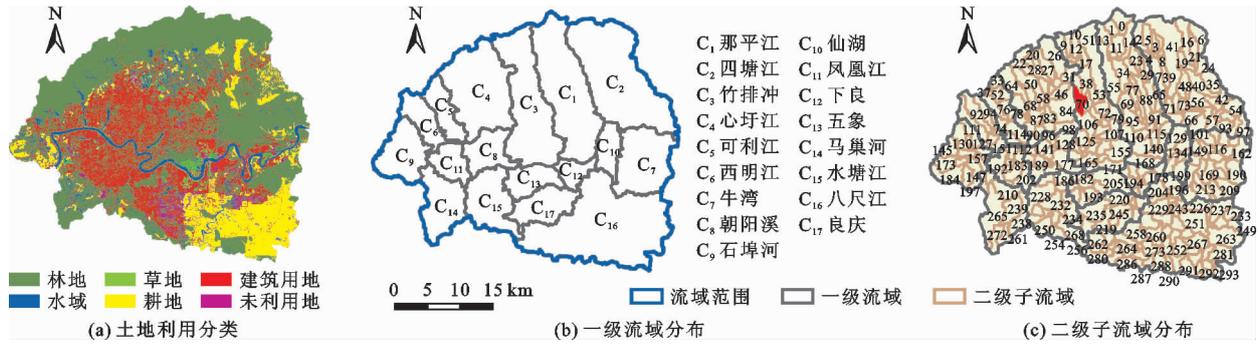


图2 南宁市市区流域2020年土地利用分类及子流域划分

2.3.3 研究区设计降雨量计算 根据《指南》，本文选取研究区1981–2010年18个格点的CMFD日降雨序列，逐格点计算设计降雨。（鉴于按照1981–2010年日降雨数据与1979–2018年日降雨数据分别计算出的设计降雨数值仅相差1.2%，故为了与《指南》中计算设计降雨所采用的日降雨数据保持一致性，本文采用1981–2010年共30a的日降雨数据进行分析。）

CMFD格点数据能更好地反映设计降雨量及其总量控制率的空间分异特征，而针对CMFD格点降雨量与地面观测降雨量在数值上存在的偏差，文中采用南宁市地面气象站点观测的同时段日降雨序列计算的设计降雨量 P_c （27.19 mm，该数值与《指南》中的27.90 mm对应，因采用的气象站点日降雨序列不同而略有差异）与最近的CMFD格点设计降雨量 P_d （19.47 mm）相对比进行校正，最终得出校正后的CMFD逐格点设计降雨量及其总量控制率。校正计算公式如下：

$$P_{bi} = P_{ai} \frac{P_c}{P_d} \quad (1)$$

式中： P_{ai} 、 P_{bi} 分别为校正前、后的CMFD某格点设计降雨量，mm； i 为CMFD格点序号， $i = 1, 2, \dots, 18$ 。

2.3.4 研究区子流域综合径流系数及现状降雨总量控制率确定 基于《室外排水设计标准》（GB 50014—2021）^[29]中不同类型土地利用的径流系数参考取值（表1），结合研究区2020年Quick Bird土地利用分布图，采用《指南》中按土地利用类型面积加权计算区域综合径流系数的方法（公式（2）），最终获得研究区各二级子流域的综合径流系数，则现状年降雨总量控制率 = 1 - 综合径流系数。

$$\alpha_c = \sum_{i=1}^m \left(\alpha_i \frac{A_i}{A} \right) \quad (2)$$

式中： α_c 为综合径流系数； m 为下垫面种类数； α_i 为第 i 类下垫面的径流系数； A_i 为第 i 类下垫面面积，

km^2 ； A 为区域总面积， km^2 。

表1 不同土地利用类型的径流系数参考取值^[29]

土地利用类型	雨量径流系数	本文取值
建筑用地	0.85~0.95	0.85
水域	1.00	1.00
未利用地	0.30	0.30
林地	0.10	0.10
草地	0.10~0.20	0.15
耕地	0.15	0.15

3 结果与分析

3.1 南宁市市区日降雨量时空分异

基于1981–2010年CMFD格点日降雨数据，统计研究区不同等级逐格点多年平均降雨日数并用ArcGIS空间插值得出降雨频次空间分布，如图3所示。由图3可知，研究时段内，南宁市市区小雨（0.1~10 mm/d）、中雨（10~25 mm/d）、大雨（25~50 mm/d）、暴雨（>50 mm/d）的年均降雨日数分别为109、36、14、4 d，分别占年均降雨总日数的66.87%、22.09%、8.59%、2.45%。按《指南》中南宁市日设计降雨量27.90 mm的取值（对应75%降雨总量控制率），说明南宁市海绵城市建设的降雨总量控制目标主要为中、小降雨，而对大、暴雨的控制有限，因而历年发生过多雨洪内涝。由图3中空间分布可以看出，研究区的中、小降雨发生日数总体呈东部多（ C_1 、 C_2 、 C_7 、 C_{16} 流域）西南少（ C_{11} 、 C_{14} 、 C_{13} 、 C_{15} 、 C_{17} 流域）的分布格局，而大、暴雨发生日数则呈南部多（ C_{14} 、 C_{16} 流域）北部少（ C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 流域）的分布格局。此外，计算的全局Moran's I指数（ I ）值变化范围为0.82~0.88（文中所有Moran's I指数计算结果的 p 值均小于0.01显著水平，置信度达到99%，均通过显著性检验， z 值均超过了临界值2.58），亦表明各等级降雨事件的频次空间分布呈现正自相关，具有显著的空间异质性。

3.1.1 时间分异 1981-2010 年南宁气象站多年平均的逐日、逐月降雨量如图 4 所示。由图 4 可见,南宁市年内逐日、逐月降雨量时间分配极不均匀,序列变异系数分别达到了 0.70 和 0.79,表明时间变化异质性显著。其中,7 月降雨量最大,为 235.49 mm(占全年 18.30%),12 月降雨量最小,为 24.66 mm(占全年 1.92%),5-9 月降雨量占全年的

71.48%,12-2 月降雨量仅占全年的 8.86%;在季节分配上,降雨量从大到小依次为夏季 623.97 mm(48.48%)、春季 334.32 mm(25.97%)、秋季 214.79 mm(16.69%)、冬季 114.03 mm(8.86%)。

3.1.2 空间分异 基于 1981-2010 年校正后的 CMFD 格点逐日降雨数据,分别计算各格点逐月的日平均降雨量并进行插值得到空间分布,如图 5 所示。

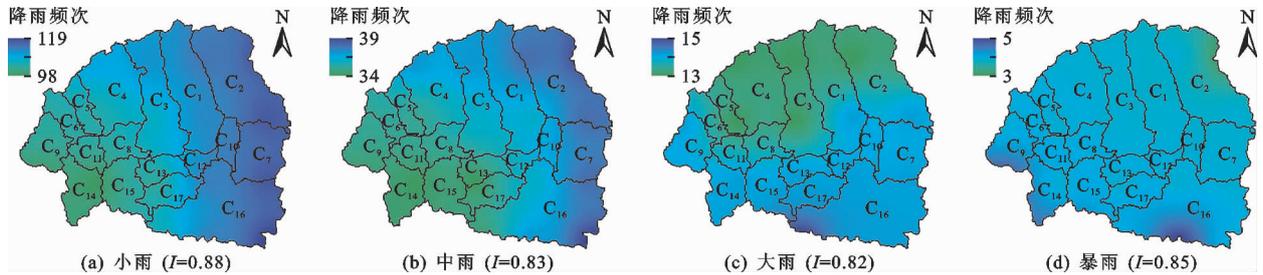


图 3 1981-2010 年南宁市市区各等级日降雨事件多年平均降雨频次空间分布

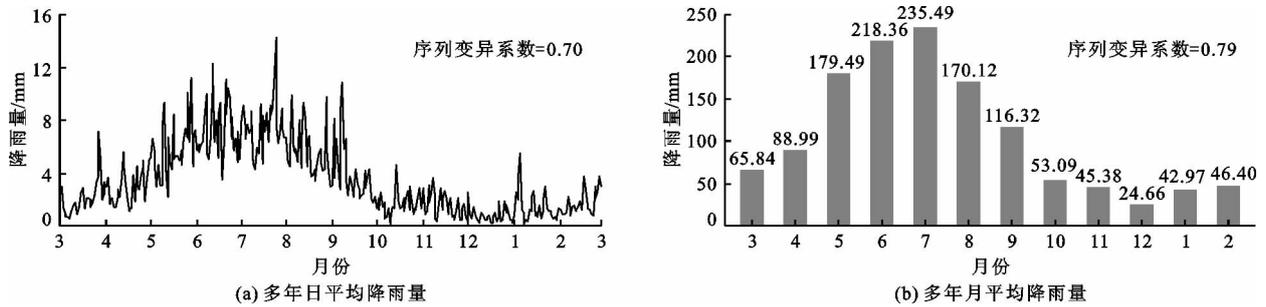


图 4 1981-2010 年南宁气象站多年日平均及月平均降雨量

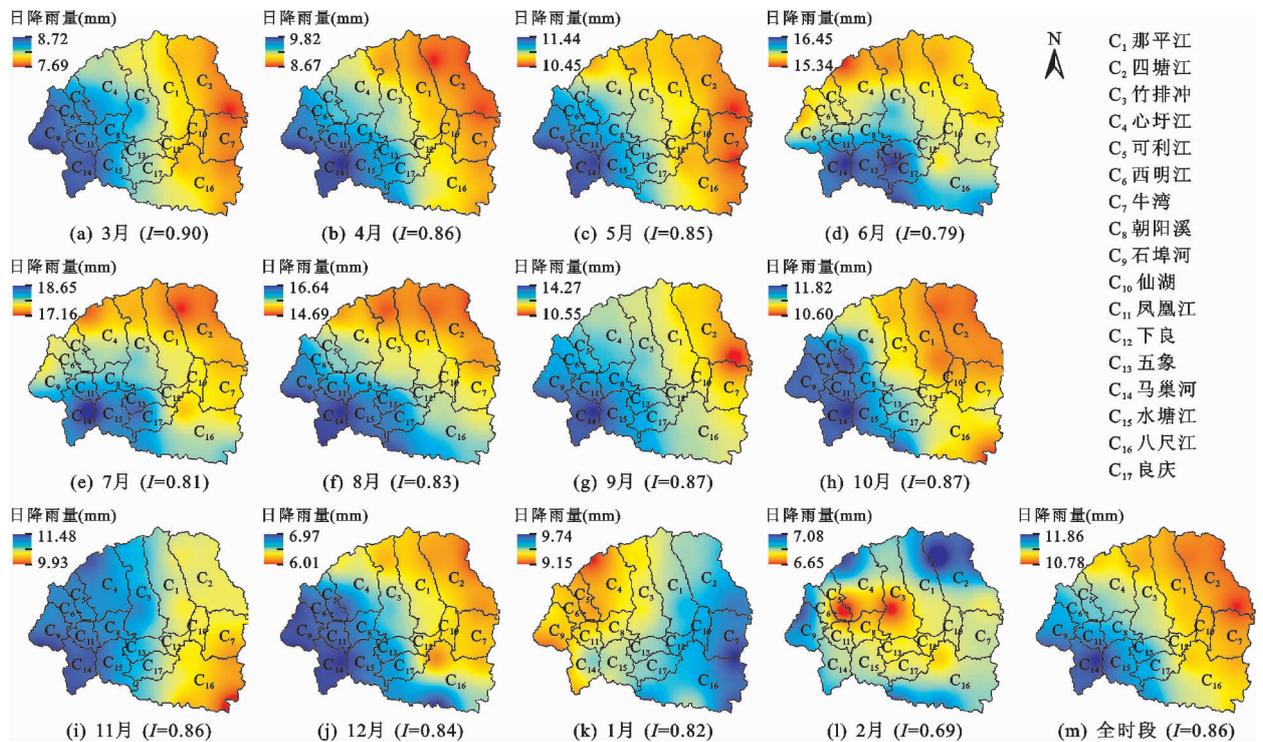


图 5 1981-2010 年南宁市市区各月及全时段日平均降雨量空间分布

由图5可知,南宁市区的春季3-5月、夏季6-8月、秋季9-11月的日均降雨量空间分布在各季节内具有较好的一致性,而冬季12、1、2月的日均降雨量空间分布均有较大差异;各季节间,春季与夏季空间分布最为接近、夏秋及春秋间次之、冬季与其他各季节之间的差异最大;全年日均降雨量空间分布受春、夏、秋季节的综合影响较大而具有相对一致性;在日均降雨量数值上,大小排序基本为夏季各月>秋季各月>春季各月>冬季各月。此外,计算的全局Moran's I指数(I)变化范围为0.69~0.90,表明南宁市市区各月及全年日降雨均值在空间分布上均呈现正自相关,加之日降雨发生频次及年内分配的时间变异性,可知研究区次降雨具有显著的时空异质性特征。因此,细化研究区的基本计算单元(即5 km²以内的294个二级子流域),并考虑下垫面精细化土地利用类型,获得反映年内逐月时变差异及空间异质性的设计降雨量及其总量控制率成果,是有效指导海绵城市建设的一个关键途径。

3.2 南宁市市区设计降雨量及其降雨总量控制率时空分布

根据海绵城市建设《指南》及《标准》的定义,先以南宁市气象站点、研究区18个CMFD格点1981-2010年逐日降雨分别按各月及全时段计算设计降雨量及其降雨总量控制率,再按2.3节的研究方法对CMFD格点的设计降雨量结果进行校正,最终获

得南宁市市区海绵城市试点建设核心区域——竹排冲流域设计降雨量及其总量控制率的逐月时间变化及南宁市市区设计降雨量及其总量控制率的逐月及全年空间分布。

3.2.1 时间分异 图6为南宁市海绵城市试点建设的核心区域竹排冲流域(C₃流域)的日设计降雨量与降雨总量控制率关系曲线。由图6可知,按《指南》中75%降雨总量控制率,竹排冲流域在不同月份对应的日设计降雨量存在较大差异。具体地,如春季的3-4月、夏季的8月、秋季的10-11月、冬季12-2月的日设计降雨量均小于全时段的25.69 mm,其中2月仅为9.72 mm,即这些月份若按全时段的设计降雨量考核,其对应的降雨总量控制率必然显著大于75%,完全达标;而其他月份如春夏季的5-7月、秋季的9月的日设计降雨量均大于全时段的25.69 mm,其中7月的设计降雨量最大,为32.05 mm,这些月份按75%的降雨总量控制率考核则明显不达标。由此说明,南宁市仅以多年时段确定的单一设计降雨量来指导海绵城市建设,会在不同月份中存在达标与不达标并存的现象,因此,海绵城市建设成效考核的设计降雨量及其降雨总量控制率有必要考虑年内各月的日降雨或场次降雨分配差异,并结合全年时段制定更为合理或动态变化的设计参数和考核指标,以期更好地实现城市雨洪管理的下垫面系统海绵功能。

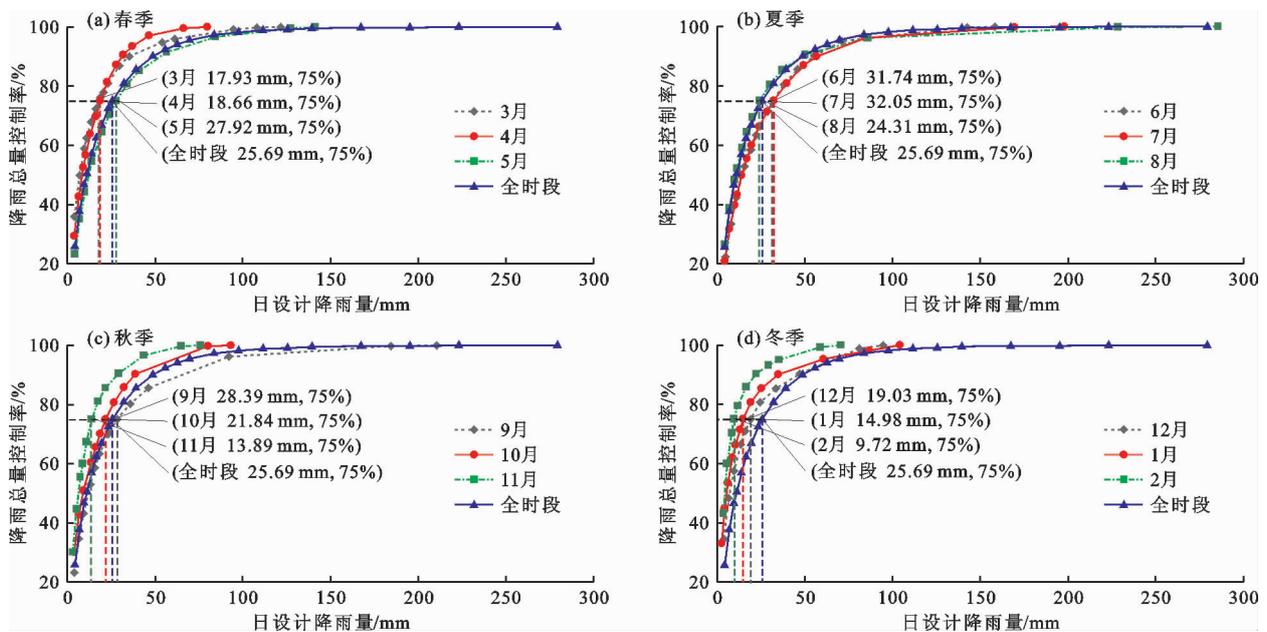


图6 南宁市市区竹排冲流域日设计降雨量与降雨总量控制率关系曲线

3.2.2 空间分异 按照上文中所述方法对日设计降雨量及降雨总量控制率进行计算并校正,二者在各月

及全时段的空间分布如图7所示(图中仅显示典型月份,即分布一致时仅显示某一月份分布图)。由图7

可知:(1)在日设计降雨量方面,春季 3-5 月、秋季 9-11 月、冬季的 12 及 2 月总体表现为西南大东北小的空间分布特征;夏季 6-8 月及全年时段呈南大北小、冬季的 1 月呈东大西小的分布格局;而日设计降雨量数值在 2 月最低的 9.59 mm 至 7 月最高的 34.68 mm 之间变化。由此说明,南宁市市区按 75% 的单一降雨总量控制率指标考核,会在研究区不同子流域上出现差异较大的设计降雨量阈值,而计算的全局 Moran's I 指数 (I) 的变化范围为 0.78~0.91,表明各月及全年的日设计降雨量在空间分布格局上均呈现正自相关,即研究区日设计降雨量存在显著的空间异质性特征。(2)在降雨总量控制率方面,其空间格局分别表现为东高西低(如 3、10、11、12 月)、东北高西南低(如 4、5、9 月)、北高南低(如 6、7、8 月及全年时

段)、西南高东北低(1 月)以及周边高中心低(2 月)等多种分布特征;其数值在 67.68% (7 月最小值)~96.78% (11 月最大值)之间变化。由此说明,若南宁市市区按日设计降雨量 27.19 mm 计算对应的降雨总量控制率,则在研究区不同子流域存在显著高于或低于 75% 控制率阈值的问题,计算的全局 Moran's I 指数 (I) 变化范围为 0.76~0.90,表明各月及全年降雨总量控制率在空间分布格局上均呈现正自相关,即研究区降雨总量控制率因降雨量差异亦存在显著的空间异质性。

综上所述,南宁市的海绵城市建设及考核应进一步考虑降雨量及其总量控制率的空间异质性特征,制定更为有效和精准的考核指标体系,而非单一的指标阈值。

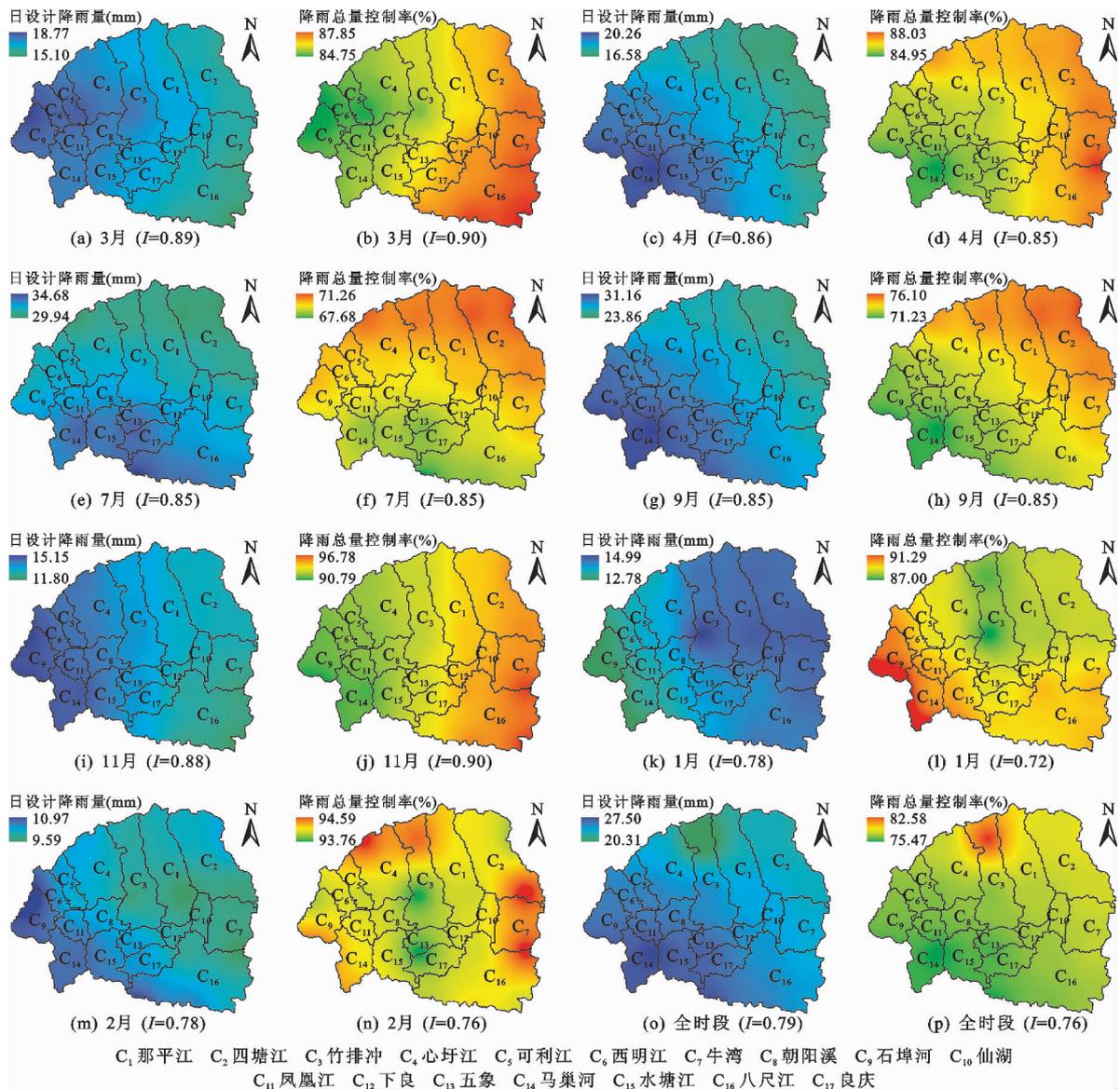


图 7 南宁市市区典型月及全时段的日设计降雨量及降雨总量控制率空间分布

3.3 南宁市市区现状降雨总量控制率空间分布

按海绵城市建设《指南》中所述的南宁市日设计降雨量 27.90 mm 及其对应的 75% 降雨总量控制率,仅是考虑南宁市降雨特征的海绵城市建成考核的目标阈值,而并未涉及现状水平的实际控制率水平。通过 2017 年南宁市海绵城市建设成效考核发现,主城区实际降雨总量控制率约为 52%,80% 以

上的区域未达到 75% 的目标^[26]。因此,为更有效地推进海绵城市建设,亟待考虑现状城市下垫面径流系数时空分布特征,明确设计降雨量-下垫面蓝、绿、灰景观格局-径流系数-年降雨总量控制率之间的定量关系^[9,21]。为此,本文分别计算了每个子流域的现状综合径流系数及年降雨总量控制率,结果如图 8 所示。

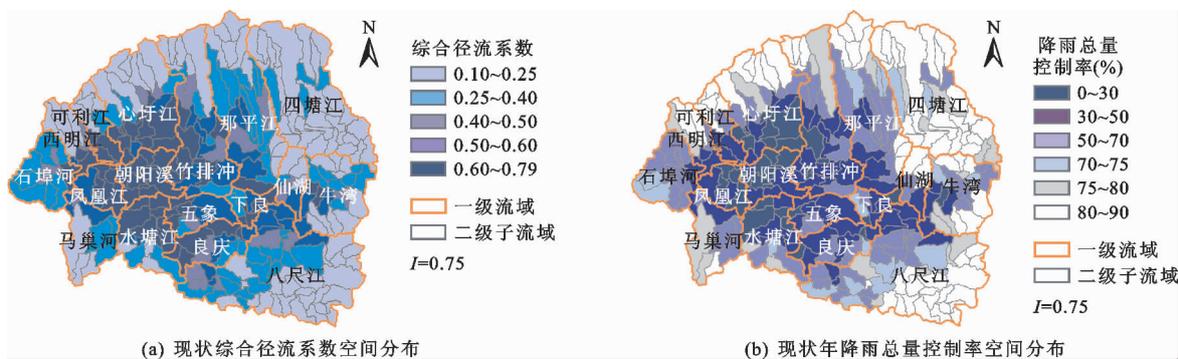


图 8 南宁市市区现状综合径流系数及年降雨总量控制率空间分布

由图 8 可知,南宁市市区现状综合径流系数总体呈市中心(高值)逐渐向四周递减(低值)、年降雨总量控制率总体呈市中心(低值)逐渐向四周递增(高值)的空间分布格局。具体地,现状综合径流系数在主城区的朝阳溪、凤凰江、水塘江等流域及其周边区域达到 0.60~0.79(占研究区面积的 19.66%),数值在 0.40~0.60、0.25~0.40、0.10~0.25 的区域面积占比分别为 18.59%、22.20%、39.55%(图 8(a))。而现状年降雨总量控制率在主城区主要为 0~50%(占研究区面积的 31.99%),数值在 50%~75% 的区域主要分布在主城区周边(面积比例为 28.46%),数值在 75%~90% 的区域则主要为整个市区周边尚在逐步开发的区域(面积比例为 39.55%)(图 8(b))。此外,计算二者的全局 Moran's I 指数(I)均为 0.75,表明其空间分布均呈正自相关,即研究区现状综合径流系数及年降雨总量控制率均存在显著的空间异质性。综上可知,南宁市主城区现状年降雨总量控制率普遍低于 50%(对应径流系数普遍高于 0.5),且主要都是以不透水面为主的老城区,仅靠有限的绿色 LID(low impact development)设施难以实现 75% 的控制率目标,亟待挖掘蓝色(水体空间)与灰色(滞蓄设施) LID 设施潜力来提高降雨总量控制率水平。

4 讨论

鉴于上述问题,进一步挖掘下垫面调蓄设施和

管网排水两个方面的潜力是提高降雨总量控制率的主要途径。本节即针对这两个方面进行定量估算,并建立二者与年降雨总量控制率之间的对应关系。

4.1 南宁市市区下垫面调蓄量及其空间分布

基于研究区 2020 年土地利用及子流域划分及 2.3 节公式(2)计算的综合径流系数,本节采用《指南》中所述容积法计算各子流域的调蓄容积。计算公式如下:

$$V = 10H \cdot \varphi \cdot F \quad (3)$$

式中: V 为设计调蓄容积, m^3 ; H 为设计降雨量, mm ,该研究取各二级子流域降雨总量控制率 75% 对应的全时段设计降雨量, mm ; φ 为综合径流系数; F 为各二级子流域面积, hm^2 。

为方便横向对比,将公式(3)计算的各二级子流域总调蓄容积转化为单位面积的调蓄容积 V_1 ,即 $V_1 = V/F$,研究区单位面积调蓄容积 V_1 的空间分布见图 9。此外,以竹排冲流域中的 70 号二级子流域为例,建立了该子流域年降雨总量控制率及其相应的单位面积调蓄容积 V_1 、所需的单位面积调蓄容积 W_1 与设计降雨量的定量关系,如图 10 所示。

由图 9 可知,为满足 75% 的年降雨总量控制率目标,南宁市市区单位面积所需要的调蓄容积最大为 $211 m^3/hm^2$ 、最小为 0(控制率已达 75% 区域);主城区调蓄容积主要在 $120 \sim 211 m^3/hm^2$ (面积占比 34.25%),周边区域在 $0 \sim 120 m^3/hm^2$ 之间变化(面积占比 27.45%),其余地区为 0;其全局 Moran's I 指

数(I)为 0.74,表明其空间分布呈现正自相关,总体具有显著的空间异质性特征。图 10 反映了不同设计降雨量和年降雨总量控制率目标下实现海绵城市调控雨洪径流所需的单位面积调蓄容积(如 70 号子流域按 75% 控制率目标,还需要建设的 LID 设施调蓄容积为 $169.03 \text{ m}^3/\text{hm}^2$),由此即可量化各子流域海绵城市还需要建设的蓝、绿、灰 LID 设施。

4.2 南宁市市区下垫面管网排水能力空间分布

按《指南》中定义的年径流总量控制率为“不外排”的降雨总量控制率^[20],诸多海绵城市(尤其是老城区)建设试点区域面临着考核难以达标的现实。为此,浙江省、重庆市等已将外排水量也纳入该控制率指标范畴^[22-23]。本节即针对该控制率是否考虑外排,结合 4.1 节的结果,综合讨论满足控制率指标所需要的调蓄容积空间分布及其与年降雨总量控

制率之间的对应关系。首先估算研究区各二级子流域的单位面积排水能力 V_2 , 结果见图 11; 然后按公式(4)、(5) 计算考虑外排后各二级子流域所需的单位面积调蓄容积 W_1 , 结果见图 12。

$$W = 10H(\varphi - \varphi_0)F \quad (4)$$

$$W_1 = W/F \quad (5)$$

式中: W 为扣除外排后还需控制及利用的雨水径流总量, m^3 ; φ_0 为外排径流系数, 这里的 φ_0 即为径流峰值控制所对应的径流系数(也即流量径流系数), 按《建筑与小区雨水控制及利用工程技术规范》(GB 50400—2016) 所述, 其取值一般根据区域规划确定, 当区域规划中没有给出该值时, 可取 0.2 ~ 0.4, 本文中基于该取值范围, 按各二级子流域不透水率插值确定(如不透水率 42% 对应的 φ_0 值为 0.28)。

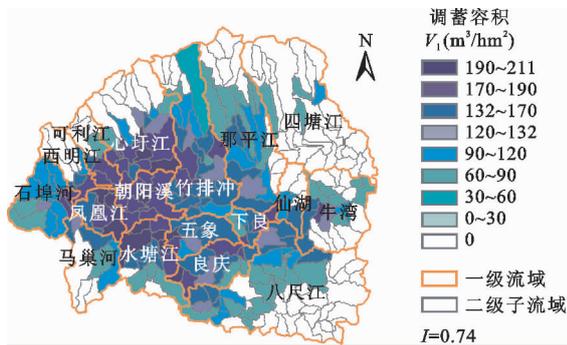


图 9 南宁市区各子流域单位面积调蓄容积 V_1 的空间分布

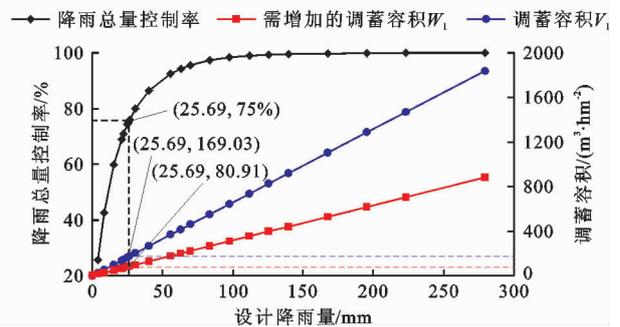


图 10 年降雨总量控制率、 W_1 、 V_1 与设计降雨量关系曲线(70 号子流域)

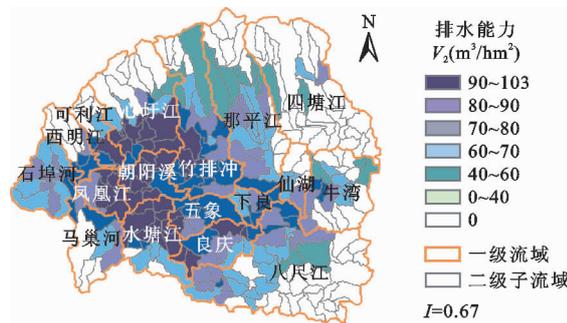


图 11 南宁市区各子流域单位面积排水能力 V_2 的空间分布

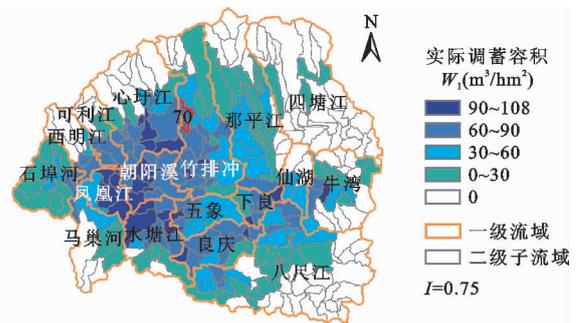


图 12 南宁市区各子流域所需的单位面积调蓄容积 W_1 (考虑外排后)

由图 11 可知,南宁市主城区单位面积的管网排水能力在 $70 \sim 103 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 之间(面积占比 38.42%),研究区周边尚在开发中的大部分区域管网排水能力为 0(面积占比 38.30%),其余局部区域的管网排水能力在 $40 \sim 70 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 之间(面积占比 23.28%)。图 12 则反映出进一步考虑外排水量后,提高年降雨总量控制率水平还需要的下垫面

LID 设施调蓄容积,如 $60 \sim 108 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 的主城区面积比例为 23.75%, $0 \sim 60 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 的区域面积比例为 37.95%,其余地区为 0。针对具体的 70 号二级子流域,扣除外排水量后,还需要建设的 LID 单位面积调蓄容积为 $80.91 \text{ m}^3/\text{hm}^2$,由此即可构建在考虑外排的不同年降雨总量控制率目标下,实现海绵城市调控雨洪径流所需的单位面积调蓄容积。此外,

研究区排水能力及考虑排水后的调蓄容积空间分布的全局 Moran's I 指数 (I) 分别为 0.67 和 0.75, 表明二者的空间分布均呈现正自相关, 即总体存在显著的空间异质性。

综上所述, 针对当前南宁市海绵城市建设的年降雨总量控制率成效考核普遍不达标、雨洪径流量调控指标单一且未考虑时空异质性等诸多问题, 首先应考虑降雨量的时空分异特征来细化《指南》中的设计降雨量及其年降雨总量控制率目标阈值; 其次, 进一步考虑现状下垫面调蓄与排水能力空间分异格局, 最终构建南宁市各子流域的设计降雨量 - 年降雨总量控制率 - 径流系数 - 排水能力 - 蓝、绿、灰 LID 调蓄容积之间的定量函数关系数据库, 才能在现状水平下定量化指导和推进南宁市海绵城市的 LID 设施建设。

5 结论

本文通过对南宁市区日降雨量、设计降雨量及其年降雨总量控制率的时空分异特征分析, 并按 75% 控制率目标讨论了其现状下垫面调蓄及管网排水对年降雨总量控制率的定量影响和对应关系, 得出以下主要结论:

(1) 南宁市市区日降雨量、设计降雨量及其年降雨总量控制率均具有显著的时空异质性特征。年内 88.96% 的日降雨为小雨和中雨, 降雨量在年内分配极不均匀, 5-9 月降雨量占全年的 71.46%; 5、6、7、9 月的日设计降雨量(竹排冲流域)均大于多年平均阈值 25.69 mm, 其他月份则小于该阈值。为进一步指导南宁市下垫面全域化调控雨洪径流的小、中、大海绵建设, 其设计降雨量及年降雨总量控制率的时空异质性亟待量化。

(2) 南宁市市区现状综合径流系数总体呈现以市区中心的 0.60~0.79 逐渐向四周递减的空间分异格局; 年降雨总量控制率在市区中心因高不透水面积比率较大而均小于 50%, 仅靠有限的绿色 LID 设施难以实现 75% 的年降雨总量控制率目标, 挖掘蓝色(水体空间)与灰色(滞蓄设施)的 LID 设施潜力是进一步提高控制率的重要途径。

(3) 是否考虑管网外排对实现南宁市年降雨总量控制率 75% 目标值及其空间异质性影响显著, 因此, 针对现状下垫面蓝、绿、灰 LID 格局, 建立考虑时空分异的不同控制率目标 - 调蓄容积 - 管网外排之间的定量函数关系, 是进一步优化和提升海绵城市系统调控雨洪径流能力的关键。

参考文献:

- [1] XIA Jun, ZHANG YongYong, XIONG LiHua, et al. Opportunities and challenges of the Sponge City construction related to urban water issues in China[J]. Science China Earth Sciences, 2017, 60(4): 652-658.
- [2] WANG Hao, MEI Chao, LIU JiaHong, et al. A new strategy for integrated urban water management in China: Sponge city[J]. Science China Technological Sciences, 2018, 61(3): 317-329.
- [3] 李兰, 李锋. “海绵城市”建设的关键科学问题与思考[J]. 生态学报, 2018, 38(7): 2599-2606.
- [4] 潘文斌, 柯锦燕, 郑鹏, 等. 低影响开发对城市内涝节点雨洪控制效果研究——不同降雨特性下的情景模拟[J]. 中国环境科学, 2018, 38(7): 2555-2563.
- [5] 马萌华, 李家科, 邓陈宁. 基于 SWMM 模型的城市内涝与面源污染的模拟分析[J]. 水力发电学报, 2017, 36(11): 62-72.
- [6] 任南琪, 张建云, 王秀衡. 全域推进海绵城市建设, 消除城市内涝, 打造宜居环境[J]. 环境科学学报, 2020, 40(10): 3481-3483.
- [7] 申红彬, 张书函, 徐宗学. 北京未来科技城 LID 分块配置与径流削减效果监测[J]. 水利学报, 2018, 49(8): 937-944.
- [8] 杨默远, 潘兴瑶, 刘洪禄, 等. 考虑场次降雨年际变化特征的年径流总量控制率准确核算[J]. 水利学报, 2019, 50(12): 1510-1517+1528.
- [9] 夏军, 石卫, 王强, 等. 海绵城市建设中若干水文学问题的研讨[J]. 水资源保护, 2017, 33(1): 1-8.
- [10] NGUYEN T T, NGO H H, GUO Wenshan, et al. Implementation of a specific urban water management—Sponge City[J]. Science of the Total Environment, 2019, 652: 147-162.
- [11] 张建云, 王银堂, 胡庆芳, 等. 海绵城市建设有关问题讨论[J]. 水科学进展, 2016, 27(6): 793-799.
- [12] 徐宗学, 程涛. 城市水管理与海绵城市建设之理论基础——城市水文学研究进展[J]. 水利学报, 2019, 50(1): 53-61.
- [13] 王浩, 梅超, 刘家宏. 海绵城市系统构建模式[J]. 水利学报, 2017, 48(9): 1009-1014+1022.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 海绵城市建设技术指南: 低影响开发雨水系统构建(试行)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部办公厅. 海绵城市建设绩效评价与考核办法(试行)[EB/OL]. (2015-07-10) [2022-03-15] <http://www.cuwa.org.cn/wushuichuli/478.html>.

(下转第 53 页)

- 水利,2020(10):34-35+38.
- [11] 张静,任志远,张嘉琪. 汾河中下游土地生态系统固碳释氧动态测评[J]. 干旱地区农业研究,2018,36(2):242-249.
- [12] TENNANT D L. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources[J]. Fisheries, 1976, 1(4): 6-10.
- [13] 王鸿翔,张爱民,郭文献,等. 基于生态水文法的城市河流生态基流综合评估[J]. 中国农村水利水电,2017(7):67-71.
- [14] 中华人民共和国水利部. 河湖生态环境需水计算规范(附条文说明):SL/Z 712—2014 [S]. 北京:中国水利水电出版社,2015.
- [15] 季小兵,马玉其,王新友,等. 基于1960-2018年实测径流与水文学方法的开都河生态流量分析[J]. 水资源与水工程学报,2020,31(6):17-23+30.
- [16] 吴喜军,李怀恩,董颖,等. 基于基流比例法的渭河生态基流计算[J]. 农业工程学报,2011,27(10):154-159.
- [17] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 水文情报预报规范:GB/T 22482—2008 [S]. 北京:中国标准出版社,2008.
- [18] 于龙娟,夏自强,杜晓舜. 最小生态径流的内涵及计算方法研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2004,32(1):18-22.
- [19] 潘扎荣,阮晓红,徐静. 河道基本生态需水的年内展布计算法[J]. 水利学报,2013,44(1):119-126.
- [20] 宋兰兰,陆桂华,刘凌. 湿周法的改进和应用[J]. 水利水电技术,2007,38(10):10-13.
- [21] 刘苏峡,莫兴国,夏军,等. 用斜率和曲率湿周法推求河道最小生态需水量的比较[J]. 地理学报,2006,61(3):273-281.
- [22] 倪晋仁,崔树彬,李天宏,等. 论河流生态环境需水[J]. 水利学报,2002,33(9):14-19+26.
- [23] GIPPEL C J, STEWARDSON M J. Use of wetted perimeter in defining minimum environmental flows [J]. Regulated Rivers: Research & Management, 1998, 14(1): 53-67.
- [24] 栾清华,李玮,刘家宏,等. 汾河清水复流工程生态影响及价值评价[J]. 人民黄河,2015,37(5):62-65.
- [25] 王秋霞. 汾河流域生态环境现状初步调查及评价[J]. 山西水利,2017(1):18-19+21.
- [26] 孟慧颖. 河流生态基流的计算方法及其适用性分析[J]. 科技传播,2013,5(9):135+127.

(上接第44页)

- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局. 海绵城市建设评价标准:GB/T 51345—2018 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2018.
- [17] 张质明,胡蓓蓓,李俊奇,等. 中国日降雨空间变化对雨水径流源头总量控制的影响[J]. 水科学进展,2018,29(4):465-472.
- [18] 刘家宏,丁相毅,邵薇薇,等. 不同水文年型海绵城市径流总量控制率特征研究[J]. 水利学报,2019,50(9):1072-1077.
- [19] 王家彪,沈子寅,赵建世,等. 关于低影响开发设施设计降雨量确定方法的讨论[J]. 中国给水排水,2019,35(1):127-133.
- [20] 申红彬,徐宗学,张书函,等. 不同汇流关系LID降雨控制方式分析检验[J]. 水利学报,2019,50(5):578-588.
- [21] 夏军,张永勇,张印,等. 中国海绵城市建设的水问题研究与展望[J]. 人民长江,2017,48(20):1-5+27.
- [22] 靳俊伟,黄丽萍,程巍. 重庆市海绵城市年径流总量控制指标解读[J]. 中国给水排水,2016,32(6):15-18.
- [23] 肖友淦. 基于SWMM的年径流总量控制率计算探讨[J]. 给水排水,2019,55(7):64-69.
- [24] 张伟,王家卓,车晗,等. 海绵城市总体规划经验探索——以南宁市为例[J]. 城市规划,2016,40(8):44-52.
- [25] 韦肖莹. 基于海绵城市建设背景下的南宁市滨水景观规划设计研究[D]. 南宁:广西大学,2017.
- [26] 赵亮,陈彬,冯步广,等. 南宁海绵城市试点建设的阶段性总结与实践探索[J]. 中国给水排水,2017,33(24):1-6.
- [27] 朱钊. 海绵城市规划空间尺度研究:流域水文尺度的视角[J]. 北京规划建设,2018(4):49-52.
- [28] HE Jie, YANG Kun, TANG Wenjun, et al. The first high-resolution meteorological forcing dataset for land process studies over China[J]. Scientific Data, 2020, 7(1): 25.
- [29] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 室外排水设计标准:GB 50014—2021 [S]. 北京:中国计划出版社,2021.