

DOI: 10.5846/stxb202111093140

李国婉, 夏兵, 隋己元, 王耀建, 杨海军, 杨慧琛, 王燕华, 黎华寿. 海绵城市建设对流域海绵体生态水文过程的改善. 生态学报, 2022, 42(24): 10098-10110

Li G W, Xia B, Sui J Y, Wang Y J, Yang H J, Yang H C, Wang Y H, Li H S. Sponge city construction improves eco-hydrological process of spongy body in watershed. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(24): 10098-10110.

海绵城市建设对流域海绵体生态水文过程的改善

李国婉^{1,2,3}, 夏兵^{2,3}, 隋己元⁴, 王耀建^{2,3}, 杨海军^{2,3,5}, 杨慧琛^{2,3}, 王燕华^{2,3}, 黎华寿^{1,*}

1 华南农业大学资源环境学院, 广东省生态循环农业重点实验室, 广州 510642

2 深圳市北林苑景观及建筑规划设计院有限公司, 深圳 518055

3 广东省城市生态空间可持续发展工程技术研究中心, 深圳 518055

4 深圳市罗湖区水务局水污染治理中心, 深圳 518003

5 云南大学生态与环境学院, 昆明 650091

摘要:快速城市化驱动的不透水面比例增加是引起流域洪峰和径流总量增加的直接原因, 海绵城市建设通过生态基础设施网络构建增加流域透水面比例, 是重构流域生态水文过程的重要途径。但是海绵城市建设在流域海绵体生态水文过程中发挥的作用尚不清楚。以深圳市布吉河流域洪湖片区为例, 通过雨季水文过程要素在线连续监测来确定海绵城市建设是否改善洪湖片区生态水文过程。结果表明, 中观尺度上, 雨季降雨量对洪湖片区地表径流总量无直接影响, 降雨强度显著影响洪湖片区地表径流峰值流量 ($P < 0.05$), 日降雨量对布吉河水质影响极显著 ($P < 0.01$)。洪湖片区通过 28.3% (0.85 km²) 海绵面积建设, 透水面比例提升, 以生物滞留设施和透水铺装等强化片区蒸散和下渗过程, 减少雨季径流 97.2% (248.72 万 m³), 削减典型降雨峰值流量 98.2% 以上, 降低易涝点积水水位至 7.8 cm 以下, 2.8% 形成河川径流 (布吉河), 海绵面积 (比例) 和地表径流量削减无直接量化关系。洪湖片区污染物截留时空随保水能力得到提升, 控制排放悬浮物月均浓度均低于 15.60 mg/L, 污染物通过径流裹挟进入布吉河的总量和速率降低, 促使布吉河黑臭消除、水质提升至 IV 类。海绵城市建设对微观尺度生态水文过程的影响与中观尺度存在差异, 降雨量等因素与典型项目生态水文过程量化关系不明显。学校、道路和社区公园利用绿色屋顶、透水铺装等强化下渗、蒸散, 可削减雨季径流 99.0% 以上、削减峰值流量 97.0% 以上, 控制悬浮物月均浓度低于 17.10 mg/L。总之, 以上研究结果强烈表明海绵城市中微观尺度源头减排设施和调蓄设施的耦合建设模式可以削减洪湖片区径流总量、峰值流量、积水水位和径流污染, 是一种改善相似流域生态水文过程的有效途径。

关键词:流域; 径流; 峰值流量; 监测; 水质

Sponge city construction improves eco-hydrological process of spongy body in watershed

LI Guowan^{1,2,3}, XIA Bing^{2,3}, SUI Jiyuan⁴, WANG Yaojian^{2,3}, YANG Haijun^{2,3,5}, YANG Huichen^{2,3}, WANG Yanhua^{2,3}, LI Huashou^{1,*}

1 Guangdong Provincial Key Laboratory of Eco-Circular Agriculture, College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

2 Shenzhen BLY Landscape & Architecture Planning & Design Institute Ltd., Shenzhen 518055, China

3 Guangdong Engineering Technology Research Center for Sustainable Development of Urban Ecological Space, Shenzhen 518055, China

4 Water Pollution Control Center, Water Affairs Bureau of Shenzhen Luohu District, Shenzhen 518003, China

基金项目:国家自然科学基金项目 (31770479); 广东省科技计划项目 (2019B030301007)

收稿日期:2021-11-09; **网络出版日期:**2022-07-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lihuashou@scau.edu.cn

5 School of Ecology and Environmental Science, Yunnan University, Kunming 650091, China

Abstract: The impervious surface increase driven by rapid urbanization directly causes flood peak and total runoff increasing in watershed. An important way to reconstruct eco-hydrological process of watershed is sponge city construction. Sponge city can enhance the pervious surface through ecological infrastructure network construction. However, the role of sponge city construction in eco-hydrological process of spongy body in watershed is still unclear. This paper takes Honghu Area of Buji River watershed in Shenzhen as an example to assess eco-hydrological process after sponge city construction. The assessment method was online continuous monitoring of hydrological process elements in rainy season. The results showed that rainfall volume in rainy season affected indirectly the total surface runoff in Honghu Area on mesoscale. The rainfall intensity significantly affected the peak runoff flow in Honghu Area ($P<0.05$). The daily rainfall volume had a very significant effect on the water quality of Buji River ($P<0.01$). Pervious surface in Honghu Area increased through sponge city construction of 28.0% (0.85 km²). The construction of biological retention facilities and permeable pavement and others strengthened the evapotranspiration and infiltration process in Honghu Area. Sponge facilities promoted Honghu Area reduced the total surface runoff in rainy season by 97.2% (2.4872 million m³). Peak flow was reduced by more than 98.2% under two typical rainfall. The water level of waterlogging points was reduced to less than 7.8 cm in rainy season. The rest 2.8% surface runoff formed river runoff of Buji River. The reduction of surface runoff had no directly quantitative relationship with sponge area (proportion). The pollutants intercepted time and space improved with the water retention capacity in Honghu Area. Adequate interception of pollutants promoted monthly average concentration of SS (suspended solids) discharge lower than 15.60 mg/L. The lower SS concentration indicated that the total amount of pollutants from runoff decreased and migrated slowly to Buji River. Effective interception of pollutants promoted black and odour in Buji River dissolved and water quality improved to Class IV. The influence of sponge city construction on eco-hydrological process on mesoscale was different with that on microscale. The quantitative relationship between rainfall and eco-hydrological process of typical projects was not obvious. School, road and community park used green roof and permeable paving and others to strengthen infiltration and evapotranspiration. The sponge facilities promoted the typical projects reduced runoff in rainy season by more than 99.0%, and reduced peak flow by more than 97.0%, and controlled monthly average concentration of SS below 17.10 mg/L. In conclusion, our research results strongly suggest that sponge city construction can reduce the total runoff, peak flow, ponding water level and runoff pollution in Honghu Area. Coupling construction of source emission reduction facilities and storage facilities on microscale and mesoscale is an effective way to improve the eco-hydrological processes of similar watershed.

Key Words: watershed; runoff; peak flow; monitoring; water quality

流域水循环改变是城市洪涝灾害频发的内在原因。全球主要流域水循环正在因气候变化、水资源管理方式和土地利用改变而发生变化^[1]。高速城镇化驱动的土地利用/覆被变化改变了流域水文过程与生态过程的互馈关系,流域降雨、蒸发、径流等水分运动过程,非点源污染物迁移过程和植被对水分行为的影响发生变化^[2]。城市不透水地面比例增加导致地表径流总量、峰值流量和径流污染增加,生态用地产水量下降^[3-4]。高速城镇化显著缩短了洪峰滞后时间、升高了洪峰峰值、改变了洪峰发生的时间节点^[5]。因此,需要新的城市建设模式来改善流域生态水文过程。

海绵城市是我国提出的一种通过“自然积存、自然渗透、自然净化”系统解决城市水问题的新的城市建设模式^[6],也是国内外城市水资源管理领域的研究热点^[7]。海绵城市建设的核心宗旨为通过改变城市土地利用/覆被形态,在屋面实施绿色屋顶、在地面实施下沉式绿地等多种生态基础设施^[8],干预水分在城市生态系统的局部运动过程,再通过水量水质变化反作用于城市生态系统,重塑城市生态水文过程^[9]。不同功能海绵设施组合方案在实际应用中发挥的作用不尽相同,高强度降雨、持续降雨和短时强降雨下海绵设施依然有

效^[10]。土地利用改变确实可以促使局部水文过程及小气候发生变化^[11-12]。并且植被可以在流域尺度上通过再分配降雨过程和强化蒸发过程影响城市水文循环^[13]。但是海绵城市建设在流域海绵体生态水文过程中发挥的作用尚不清楚。

为了定量评价流域海绵体的生态水文过程,水文过程要素的在线监测是主要的技术手段之一。国外雨洪管理水文过程评估在近 10 年迅速发展为最前沿的研究议题^[14]。国内海绵体水文过程评估还处于初始阶段。国内海绵体水文过程评估对象主要为海绵体的排水分区、易涝点、典型项目和受纳水体,监测水文要素为降水量、水量、水位、水质等,采取的技术手段主要包括模型模拟和监测^[15-16]。监测比模型模拟更能反应实际水文要素变化过程,也是模型评估的重要补充。国内典型项目监测评价和监测体系构建得到了初步发展^[6, 17]。但是缺乏流域尺度海绵体水文过程监测与评价研究。大气中的水汽冷却后以雨、雪等形式降落到屋面、地面、绿地等下垫面,一部分水分直接蒸发,一部分水分下渗到土壤被植被截留和经过蒸腾作用蒸发,土壤中剩余的水分潜流进入地表水体或者下渗补充地下水^[18]。当降水量超过城市蒸散和下渗能力时就会形成地表径流,地表径流量超过排水管网负荷时就会存在积水内涝现象^[19]。基于流域尺度下渗量和蒸发量无法通过观测获得,本文以深圳市布吉河流域洪湖片区为例,通过雨季降水量、水量、水位、水质等生态水文过程要素在线连续监测来确定海绵城市建设是否改善洪湖片区生态水文过程,为相似流域生态水文过程重塑提供科学依据。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

布吉河流域是深圳河流域一级支流,位于深圳市域中部,全长 15.78 km,流经罗湖区 7.07 km。研究区洪湖片区位于布吉河流域中游,属罗湖区高密度建成区,是深圳市最早的黄金珠宝产业集聚区。洪湖片区地势东北高、西南低,土壤以花岗岩、砂页岩发育而成的赤红壤为主,总体雨水入渗能力较好。洪湖片区属亚热带季风气候,多年平均降水量为 1975.2 mm,降雨量时空分布不均匀,呈现冬春少雨、夏秋多雨的变化规律,且多局地性强降雨,易受台风、暴雨、洪涝侵袭。以沿城市雨水管网汇流路径排入布吉河独立排放口划分排水分区,研究区域内有 4 个排水分区,分别标记为 A、B、C 和 D,如图 1 所示。

2016 年深圳市入选第二批海绵城市国家试点城市,海绵城市建设逐步取得成效。海绵城市建设前洪湖片区作为典型高密度老旧城区,基础设施薄弱,水体岸线硬化,内涝积水以及下游水体黑臭问题突出,改造空间有限。2016—2020 年间,在洪湖片区 A、B、C 和 D 排水分区落实建筑小区、道路广场和公园绿地源头减排设施,完善片区雨污分流,布吉河沿线截污纳管并且恢复生态岸线,末端强化洪湖滞洪区调蓄空间并且新建洪湖水水质净化厂,从中微观层面干预水分在城市生态系统的局部运动过程。海绵城市建设后片区综合水环境得到明显提升,受纳水体布吉河水质提升至 IV 类。洪湖片区内实施的海绵城市建设工程分布如图 1 所示。

1.2 监测方案

对洪湖片区开展 1 个雨季(2020 年 6—9 月)水文

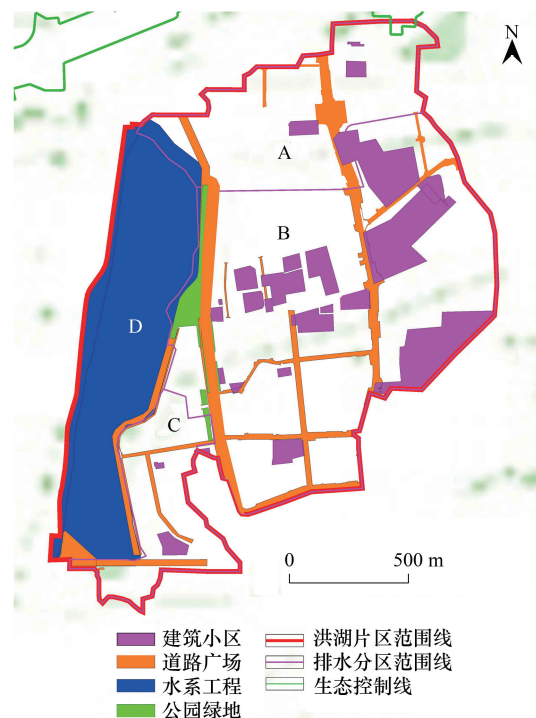


图 1 洪湖片区海绵城市建设工程分布

Fig.1 Distribution of sponge city construction projects in Honghu Area

图中 A、B、C 和 D 分别代表洪湖片区 4 个不同排水分区

过程要素连续在线监测,监测内容包括降雨量、4 个排水分区排放口排泄流量和悬浮物(SS)、3 个典型项目排泄流量和 SS、3 个易涝点积水水位和布吉河水质(表 1)。布吉河水质指标包括透明度(T)、溶解氧(DO)、氧化还原电位(ORP)、氨氮(NH₄⁺-N)、化学需氧量(COD)、总磷(TP)、SS 和 pH 等,按照相应的国家标准或行业标准检测方法要求进行检测^[20]。洪湖片区监测位点分布和雷达流量计安装示意图分别见图 2 和图 3。

表 1 洪湖片区监测内容
Table 1 Monitoring contents of Honghu Area

监测点类型 Monitoring site type	监测点编号 Monitoring site number	监测指标 Monitoring indicators	监测频次 Monitoring frequency
雨量站 Precipitation station	Y-1	降雨量	5min/次
排水分区排放口 Catchment discharge outlet	H-1、H-2、H-3	流量和 SS	流量 15min/次; SS 30min/次
排水分区溢流口 Catchment overflow outlet	Y#-1、Y#-2、Y#-3、Y#-4	流量	15min/次
典型项目 Typical program	Y#-5、Y#-6、Y#-7	流量和 SS	流量 15min/次; SS 30min/次
易涝点 Waterlogged point	N-1、N-2、N-3	水位	15min/次
受纳水体 Receiving water	BJ-1、BJ-2、BJ-3、BJ-4	水质	1—2 周/次

SS: 悬浮物 Suspended solids

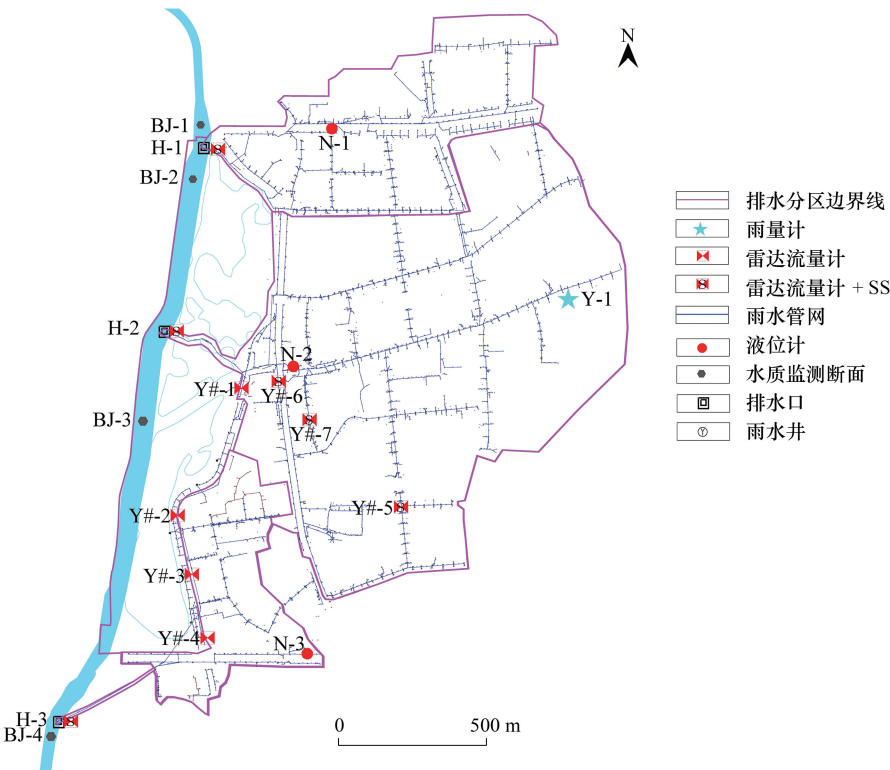


图 2 洪湖片区监测位点分布
Fig.2 Distribution of monitoring sites in Honghu Area
SS: 悬浮物 Suspended solids

1.3 数据统计方法

深圳市暴雨强度总公式如式(1)所示。本文径流总量和径流总量控制率计算公式如式(2)和式(3)所示,数据的统计计算采用 Excel 和 Origin 软件。采用 Pearson 相关系数分析排水分区面积、海绵面积(比例)、降雨量、降雨强度与地表径流总量、峰值流量的相关性,显著性水平设定为 $\alpha=0.05$,极显著性水平设定为 $\alpha=0.01$ 。

$$q = 167A_1(1 + ClgP)/(t+b)^n \quad (1)$$

$$Q = 100 \times P \times S \quad (2)$$

$$R = 100\% \times (Q - (Q_1 + Q_2)) / Q \quad (3)$$

式中, q 为暴雨强度 ($L \cdot s^{-1} \cdot hm^{-2}$), P 为重现期 (a), t 是降雨历时 (min), A_1 是雨力参数, 即假设重现期是 1 a 时的 1 min 设计降雨量 (mm), 取 9.194 mm, C 为雨力变动参数, 无量纲, 取 0.460, b 为降雨历时修正参数, 即对暴雨强度公式两边求对数后能使曲线化成直线所加的一个时间常数 (min), 取 6.840, n 是暴雨衰减指数, 与重现期有关, 无量纲, 取 0.555, Q 为径流总量 (m^3), p 为总降雨量 (mm), S 为汇水面积 (km^2), R 为径流总量控制率 (%), Q_1 为排水分区或项目溢流流量 (m^3), Q_2 为排水分区溢流进洪湖滞洪区的总流量 (m^3), 计算项目 R 时 Q_2 为 0。

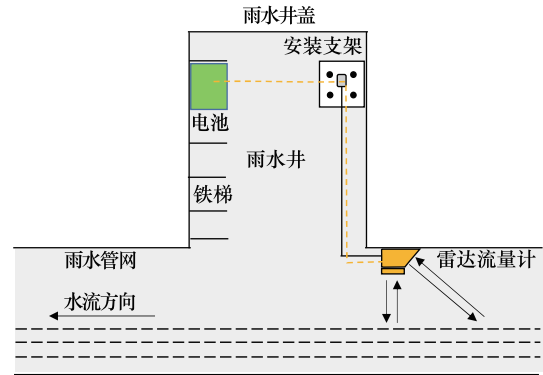


图3 雨水井雷达流量计安装示意图

Fig.3 Radar flowmeter installation diagram in rainwater well

2 结果与分析

2.1 研究区 2020 年雨季降雨特征

2.1.1 雨季降雨特征

2020 年洪湖片区全年降雨量为 1328.1 mm, 较罗湖区多年平均降雨量 (1975.2 mm) 低了 647.1 mm, 雨季降雨量降低是洪湖片区全年降雨量降低的主要原因。2020 年洪湖片区雨季降雨量为 852.6 mm (64.2%), 逐月降水分布极不均衡 (图 4)。6、7、8 和 9 月降雨量分别为 162.9 mm、57.4 mm、318.9 mm 和 313.4 mm, 以 7 月降雨量最少。2020 年洪湖片区月降雨量与月降雨日数显著正相关 ($P < 0.05$), 7 月降雨日数仅为 12d。降雨分布特征是影响雨季径流产流过程的决定性因素。

2.1.2 典型降雨场次

在 2020 年洪湖片区雨季降雨数据中筛选 2 场典型降雨作为降雨峰值强度的代表 (图 5)。

6 月 7 日 3:03—16:08 时段降雨作为接近雨水管渠设计重现期 (3 年一遇) 降雨的代表^[21], 降雨历时 785 min, 总降雨量 74.04 mm; 9 月 15 日 12:08—17:28 时段降雨作为接近内涝防治设计重现期 (50 年一遇) 降雨的代表^[22], 降雨历时 315 min, 总降雨量 75.00 mm。6 月 7 日降雨历时较长, 降雨强度较低; 9 月 15 日降雨历时较短, 降雨强度较高。降雨量、降雨强度和降雨持续时间等是评价短时强降水径流产流过程的重要参数。

2.2 片区排放口流量监测结果评价

2.2.1 排水分区径流总量控制率

海绵城市建设后洪湖片区 A、B、C 和 D 区通过分别实施 18.5% (9.26 hm^2)、28.8% (46.11 hm^2)、17.2% (5.00 hm^2) 和 40.4% (24.63 hm^2) (部分海绵设施如图 6 所示), 共削减 97.2% 的地表径流总量 (表 2), 较海绵城市建设前减少雨季地表径流 40% (依据《深圳市海绵城市建设专项规划及实施方案》布吉河片区的核算结果和规划管控目标, 洪湖片区径流总量控制率本底值为 57.2%)。排水分区面积、海绵面积 (比例) 与地表径流总量相关性不显著 ($P > 0.05$), 海绵面积 (比例) 不能直接反映海绵城市建设对地表径流的影响。洪湖片区

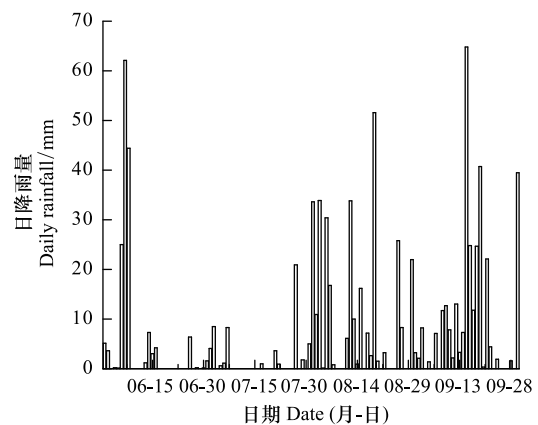


图4 2020 年雨季洪湖片区日降雨量

Fig.4 Daily rainfall of Honghu Area in rainy season of 2020

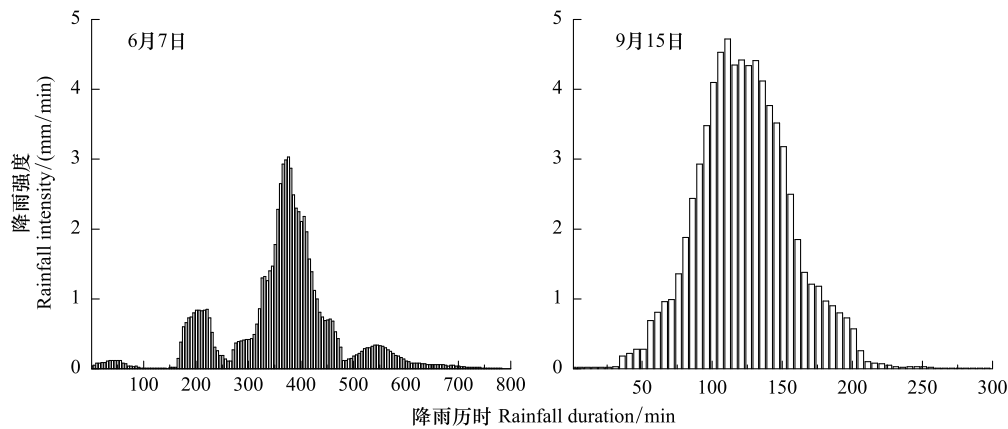


图 5 2 场典型降雨历时曲线

Fig.5 Two typical rainfall duration curves

屋面雨水通过绿色屋顶截留、雨水罐储存,地面雨水经透水铺装、下沉式绿地、雨水花园和生态停车场等渗透,再经植草沟或线性排水沟传输进入地下管网,或通过雨水回用系统进一步处理后排放,结合雨污分流强化源头减排功能。道路雨水经透水铺装或下沉式绿地渗透、植草沟或线性排水沟传输排入地下管网。公园绿地雨水经生物滞留设施和透水铺装渗透后溢流排入地下管网。末端洪湖滞洪区屋面雨水经绿色屋顶截留,地面雨水经下沉式绿地和透水铺装渗透补充地下水,其余地表径流经植草沟传输,雨水花园和生态驳岸渗滞后进入雨水湿地,净化后再利用或者储存于湖体,溢流部分排入布吉河。表明中微观尺度上通过源头减排设施和调蓄设施的耦合以增加蒸发量和蓄水量是削减洪湖片区地表径流的关键。

表 2 洪湖片区各排水分区雨季径流总量控制率

Table 2 Total runoff control rate of each catchment area in Honghu Area in rainy season								
排水分区名称 Catchment areas	面积 Area/km ²	海绵面积 Spong area/hm ²	降雨量 Rainfall/mm	径流总量 Total runoff/m ³	排放口流量 Discharge/m ³	溢流口流量 Overflow/m ³	控制径流体积 Control runoff/m ³	径流总量控制率 Total runoff control rate/%
A	0.50	9.26	852.6	426300.0	6258.3	0	420041.7	98.5
B	1.60	46.11	852.6	1364160.0	31800.2	7333.9	1325025.9	97.1
C	0.29	5.00	852.6	247254.0	25154.6	39.6	222059.8	89.8
D	0.61	24.63	852.6	520086.0	0	0	520086.0	100
洪湖片区 Honghu Area	3.00	85.00	852.6	2557800.0	63213.1	7373.5	2487213.4	97.2

表中 A、B、C 和 D 分别代表洪湖片区 4 个不同排水分区



图 6 透水铺装、雨水回用系统和植被缓冲带(布吉河)效果图

Fig.6 Effect pictures of permeable pavement, rainwater reuse system and vegetation buffer strips (Buji River)

2.2.2 排水分区削峰效果

从图 7 可以看出,排水分区面积越大,峰值流量越高,表明下垫面是影响峰值流量的关键因素之一。6 月 7 日降雨历时较长,降雨强度较低,降雨强度峰值与流量峰值发生时间接近,流量峰值较高,降雨强度与各区峰值流量显著正相关($P<0.05$),表明降雨强度过大导致雨水在下垫面发生部分下渗,但是还未下渗蓄满就形成了地表径流,发生了超渗产流。9 月 15 日降雨历时较短,降雨强度较高,流量峰值较低,降雨强度与 A 区和 B 区峰值流量显著正相关($P<0.05$),但是与 C 区峰值流量相关性不显著($P>0.05$),表明降雨强度过大导致雨水几乎未经下渗就形成了地表径流。2 场降雨 A、B 和 C 区削减的径流总量(98.2%)相近,均接近 4 万 m^3 、12 万 m^3 和 2 万 m^3 ,表明降雨强度超过洪湖片区雨水管渠设计重现期后,下垫面的下渗量接近恒定且不受降雨强度影响,产生的地表径流量与降雨强度密切相关。

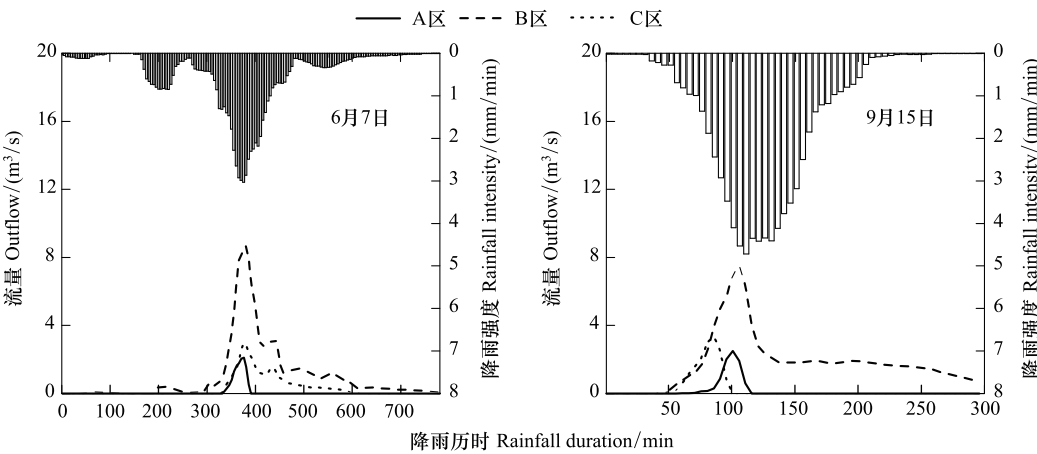


图 7 2 场典型降雨下洪湖片区各排水分区峰值流量

Fig.7 Peak flow of each catchment area in Honghu Area during the two typical rainfall

2.2.3 排水分区径流污染控制效果

从表 3 可以看出,除了 D 区,排水分区面积越大,月降雨量越高,产生的地表径流月均 SS 浓度越高,但排水分区面积、月降雨量与地表径流月均 SS 浓度相关性不显著($P>0.05$),表明降雨量、下垫面面积对地表径流污染无直接影响,降雨冲刷下垫面产生的径流污染才可能是地表径流污染的主要来源。各排水分区地表径流月均 SS 浓度低于 16 mg/L ,表明洪湖片区海绵设施发挥了作用,地表径流得到有效控制。

表 3 洪湖片区各排水分区月平均 SS 排放浓度

Table 3 Monthly average SS concentration discharged by each catchment area in Honghu Area

排水分区名称 Catchment areas	月平均 SS 排放浓度 Monthly average SS emission concentration/(mg/L)			
	6 月 June	7 月 July	8 月 August	9 月 September
A	1.53	1.63	9.66	8.81
B	7.74	1.41	15.59	3.21
C	1.08	0.54	12.42	8.81
D	0	0	0	0
洪湖片区 Honghu Area	4.49	1.08	11.13	4.03

2.3 典型源头减排项目监测结果评价

2.3.1 典型项目径流总量控制率

从表 4 可以看出,项目的地表径流总量与径流总量、项目面积均不相关($P>0.05$),表明下垫面对微观尺度地表径流总量无直接影响。从图 8 可以看出,海绵城市建设后,学校产生的雨季径流无外排,表明通过绿色屋顶截留屋面雨水、雨水回用设施调蓄地面雨水对控制学校地表径流总量有效。道路产生的雨季径流 99%

(5.50 万 m^3) 以上得到控制,表明下沉式绿地、透水铺装和环保型雨水口在道路雨水下渗和延缓地表产流方面具有重要作用。社区公园产生的雨季径流 99%(0.78 万 m^3) 以上得到控制,表明生物滞留设施和透水铺装的综合运用对社区公园地表径流产流过程有直接影响。以上结果表明海绵设施建设强化了典型项目下渗和调蓄功能,削减了地表径流总量。

表 4 洪湖片区典型项目径流总量控制率

Table 4 Total runoff control rate of typical projects in Honghu Area

项目名称 Projects	监测点编号 Monitoring site number	项目面积 Area/ hm^2	径流总量 Total runoff/ m^3	排放口流量 Discharge/ m^3	控制径流体积 Control runoff/ m^3	径流总量控制率 Total runoff control rate/%
学校 School	Y#-5	1.29	10998.5	0	10998.5	100
道路 Road	Y#-6	6.45	54992.7	26.20	54966.5	99.9
社区公园 Community park	Y#-7	0.92	7843.9	72.30	7771.6	99.1



图 8 学校、道路和社区公园海绵城市建设效果图

Fig.8 Sponge city construction effect pictures of school, road and community park

2.3.2 典型项目对降雨径流的削峰效果

从图 9 可以看出,峰值流量与项目面积无关,不同项目峰值流量存在较大差异,表明微观尺度下垫面不是影响峰值流量的直接因素。6 月 7 日长历时、低强度降雨下,学校不产流,道路流量峰值延时 90 min,社区公园流量峰值与降雨强度峰值接近且显著正相关($P<0.05$),三者峰值流量削减率均高于 97%,表明海绵城市建设后,学校削峰效果最明显,道路有明显的延锋和削峰作用,公园绿地产生超渗产流,仅 3%地表径流进入管网。9 月 15 日短历时、高强度降雨下,三个项目均不产流,表明海绵城市建设后典型项目均有抵抗短时强降雨的能力。

2.3.3 典型项目径流污染控制效果

从表 5 可以看出,项目产生的地表径流月均 SS 浓度与月降雨量、项目面积相关性不显著($P>0.05$),表明降雨量、下垫面面积对项目产生的地表径流污染无直接影响。各项目排泄 SS 月平均浓度低于 15 mg/L ,表明各项目建设的海绵设施在径流污染控制方面发挥了作用,地表径流从源头得到有效控制。

表 5 洪湖片区典型项目月平均 SS 排放浓度

Table 5 Monthly average SS concentration discharged by typical projects in Honghu Area

项目名称 Projects	月平均 SS 排放浓度 Monthly average SS emission concentration/(mg/L)			
	6 月 June	7 月 July	8 月 August	9 月 September
学校 School	0	0	0	0
道路 Road	1.95	4.21	5.03	8.12
社区公园 Community park	0.85	4.20	14.58	12.75

2.4 易涝点积水水位监测结果评价

从图 10 可以看出,海绵城市建设后,在降雨接近雨水管渠设计重现期和内涝防治设计重现期下,洪湖片

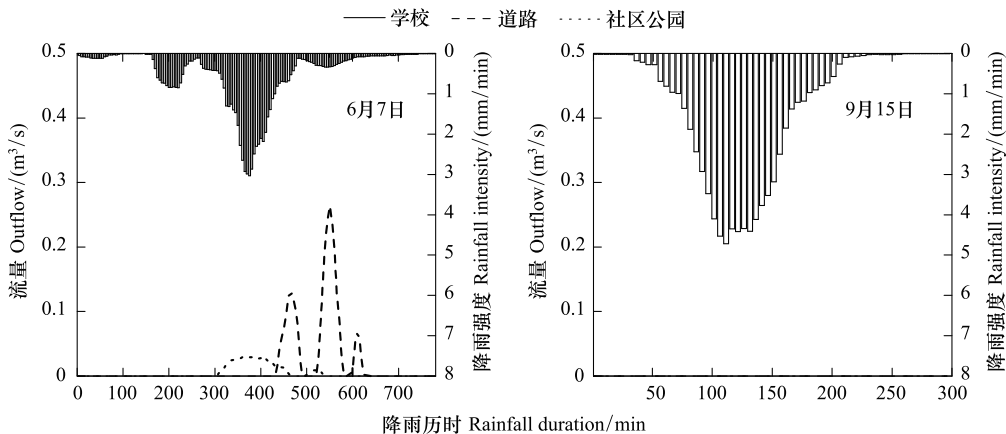


图 9 2 场典型降雨下洪湖片区典型项目峰值流量

Fig.9 Peak flow of typical projects in Honghu Area during the two typical rainfall

区 3 个易涝点积水水位均为 0,表明降雨强度、降雨时长对洪湖片区 3 个易涝点无影响,易涝点附近地表径流没有超过排水管网负荷。整个雨季出现的最大积水水位仅为 7.8 cm,并且在 15min 内退水,表明海绵城市建设后洪湖片区地表径流得到有效控制,有效缓解了雨水管网负荷。

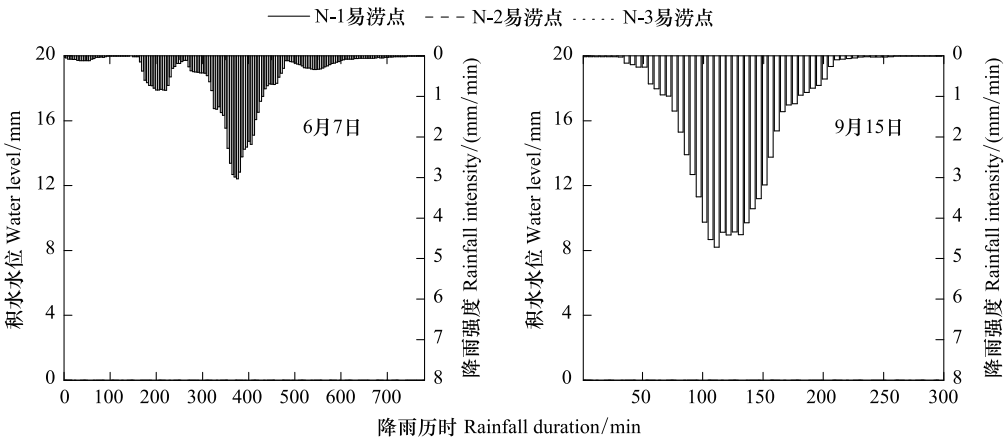


图 10 2 场典型降雨下洪湖片区易涝点积水水位

Fig.10 Water level of waterlogging points in Honghu Area during the two typical rainfall

2.5 接纳水体监测结果评价

2.5.1 水体黑臭指标评价

从图 11 可以看出,海绵城市建设后布吉河(洪湖片区段)平均 T 为 28.59 cm,DO 含量为 7.28 mg/L,ORP 为 359.81 mV,NH₄⁺-N 浓度为 0.98 mg/L,布吉河(洪湖片区段)每一个排水分区排放口的下游 T 和 DO 含量(地表水 II 类)均高于上游,下游 NH₄⁺-N 浓度(地表水 IV 类)均低于上游,ORP 均高于 250 mV^[20, 23]。以上结果表明地表径流裹挟的污染物没有超过布吉河的自净能力,水体不黑臭,水质得到明显改善。

2.5.2 其他水质指标评价

从图 12 可以看出,雨季布吉河(洪湖片区段)COD 平均浓度低于 20 mg/L(地表水 III 类),TP 低于 0.3 mg/L(地表水 IV 类)^[20],SS 浓度低于 25 mg/L,pH 在 6—9 之间,表明海绵城市建设后布吉河水质得到明显提升。布吉河(洪湖片区段)6 月和 7 月 COD 浓度基本保持在 20 mg/L 以下,8 月和 9 月 COD 浓度波动较大,以 B 区在 8 月 26 日雨水径流排放引起的 BJ-3 断面 COD 浓度波动最明显,8 月 26 日降雨 25.8 mm,表明降雨

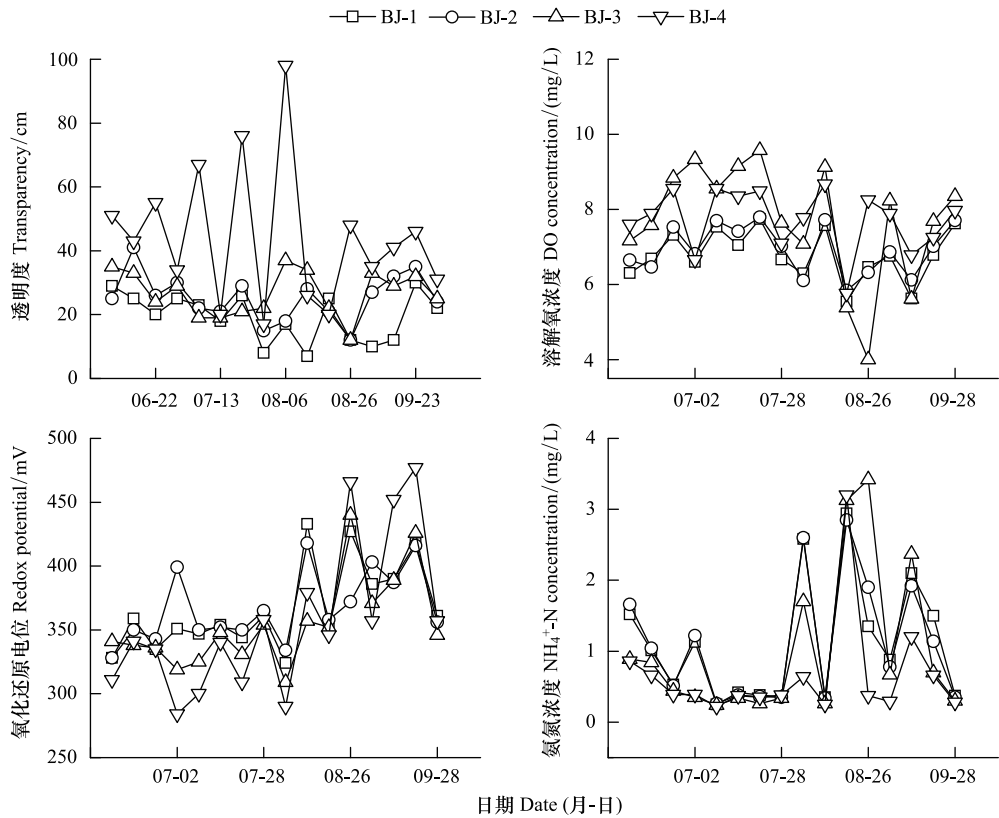


图 11 2020 年雨季布吉河(洪湖片区段)黑臭指标变化
Fig.11 Change of black odor indices of Buji River (Honghu Area) in rainy season of 2020

是影响布吉河水质的重要因素。

2.5.3 降雨对受纳水体水质的影响

从表 6 可以看出,洪湖片区日降雨量与布吉河(洪湖片区段)当日 DO、NH₄⁺-N、COD、TP 和 SS 浓度相关性极显著($P<0.01$),表明降雨作为洪湖片区的输入,经过对洪湖片区下垫面相互作用后,直接影响布吉河径流水质。

表 6 日降雨量与布吉河(洪湖片区段)水质指标相关系数

Table 6 Correlation coefficient between daily rainfall and water quality index of Buji River (Honghu Area)								
水质指标 Water quality indexes	透明度 Transparency/ cm	溶解氧浓度 DO concentration/ (mg/L)	氧化还原电位 Redox potential/ mV	氨氮浓度 NH ₄ ⁺ -N concentration/ (mg/L)	化学需氧量 COD concentration/ (mg/L)	总磷浓度 TP concentration/ (mg/L)	悬浮物含量 SS concentration/ (mg/L)	pH
相关性 Correlation	-0.148	-0.702 **	0.259	0.670 **	0.639 **	0.689 **	0.651 **	0.160

* * 代表在 0.01 水平上相关性极显著;DO: 溶解氧 Dissolved oxygen;TP: 总磷 Total phosphorus;COD: 化学需氧量 Chemical oxygen demand

3 讨论

与海绵城市建设在城市水资源管理领域中的广泛影响和重要性相比,海绵城市建设如何调节流域尺度生态水文要素变化仍是未知的。本文以深圳市布吉河流域洪湖片区的海绵城市建设为例,评估片区水文要素对透水面积变化的响应。本文通过 2020 年雨季降雨量、水量、水位和水质连续在线监测,发现中微观尺度源头减排设施和调蓄设施的耦合建设模式可以削减洪湖片区径流总量、峰值流量、积水水位和径流污染,是一种改

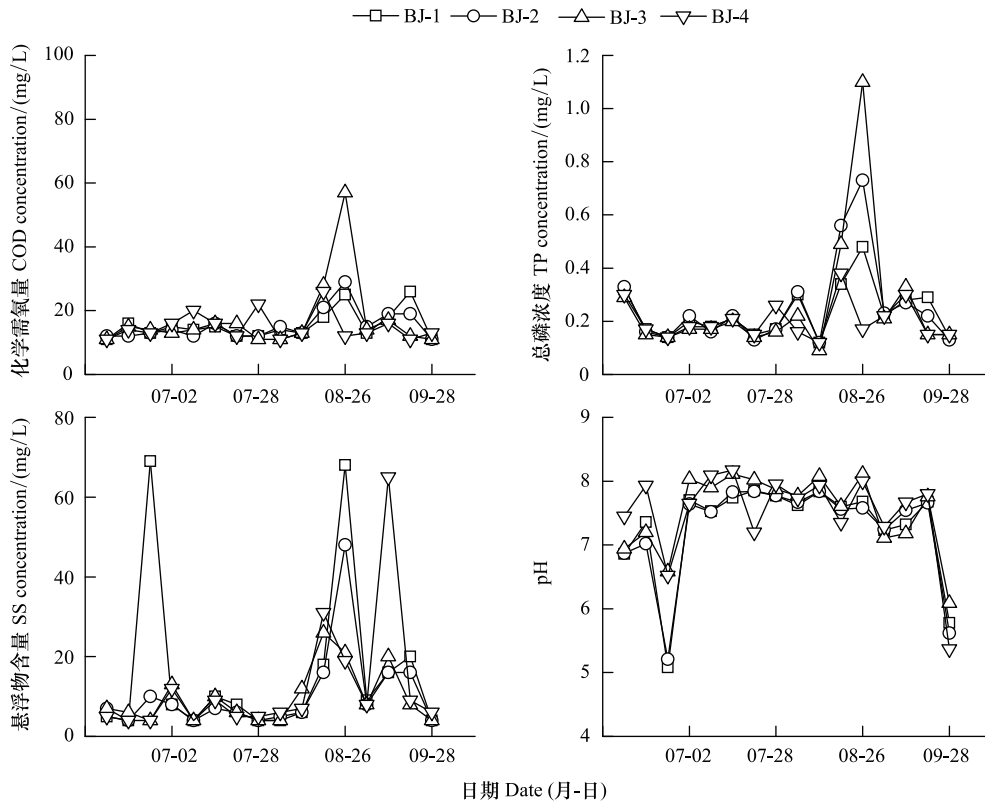


图 12 2020 年雨季布吉河(洪湖片区段)其他水质指标变化

Fig.12 Change of Other indices of Buji River (Honghu Area) in rainy season of 2020

善相似流域生态水文过程的有效途径。

在中观尺度上,雨季降雨量对洪湖片区地表径流总量无直接影响,降雨强度显著影响洪湖片区地表径流峰值流量($P<0.05$),日降雨量对布吉河水质影响极显著($P<0.01$)。这表明日间降雨分布特征对洪湖片区产生的地表径流和汇入布吉河的河川径流有直接影响,当时间尺度拉长为雨季时,降雨不再是影响径流的最直接因素。降水作为流域水文过程的汇,与城市化相比,气候变化是导致暴雨径流增加的主要因素^[24]。海绵城市建设前降水是影响深圳河流域年径流总量的最主要因素,年径流总量整体呈现增大趋势,气候变化带来的强降雨弱化了土地利用改变对径流量的影响^[25]。深圳 2008—2017 年降雨量年际变化趋势不明显,年均降雨量为 1863.9 mm,降雨量最多的是 6 月,降雨日数最多的是 7 月^[26]。海绵城市建设后,2020 年洪湖片区年降雨量较深圳市 2008—2017 年年平均降雨量降低了 535.8 mm,7 月降雨量和降雨日数反而是雨季最少的,降雨时空分布特征发生变化。表明海绵城市建设改变了洪湖片区的生态水文过程,气候变化不再是影响洪湖片区雨季地表径流总量的主要因素,仅是影响日间地表径流量的主要因素。关于海绵城市建设如何影响洪湖片区降雨分配过程还需进一步探讨。

洪湖片区通过 28.3% (0.85 km²) 海绵面积建设,通过提升透水面比例,以生物滞留设施和透水铺装等强化片区蒸发和下渗过程,减少雨季径流 97.2% (248.72 万 m³),削减典型降雨峰值流量 98.2% 以上,降低易涝点积水水位至 7.8 cm 以下,2.8% 形成河川径流(布吉河),海绵面积(比例)和地表径流量削减无直接量化关系。表明海绵面积(比例)不能完全体现洪湖片区土地利用/覆被变化,截污纳管、雨污分流、末端蓄水池对径流深度的综合影响不容忽视。源头减排设施、截污纳管、末端蓄水池的结合使用可以分别削减径流量 35%—49%,4%—15% 和 3%—36%^[27]。在排水分区尺度上,将 30% 的屋顶转化为绿色屋顶,10% 的绿地转化为雨水花园,35% 的路面转化为透水路面,可将径流控制率从 59.9% 提高到 82.2%^[28]。洪湖片区海绵城市建设可有

效削减短时高强度、长时中强度降雨峰值。片区海绵城市建设可有效削减中低强度降雨峰值已经得到证实^[29]。同一流域相邻排水分区径流峰值差异主要来源于地形影响,并且影响的重要性从基流到暴雨流逐渐增加^[30]。基于海绵城市有效削减了洪湖片区地表径流总量和径流峰值,片区内 3 处易涝点整个雨季基本无积水,表明洪湖片区海绵设施的组成和空间格局利于地表径流渗滞和传输,明显减少了地表径流在低洼处的蓄积,这也是海绵城市建设要解决的核心问题之一。研究表明影响海绵城市内涝防治效果的决定性因素是海绵设施的生物物理参数^[31]。在生态水文过程中,污染物伴随水分运动发生迁移、转化和沉降作用,海绵城市建设对洪湖片区水质影响还需进一步探讨。

洪湖片区污染物截留时空随保水能力得到提升,控制排放 SS 月均浓度均低于 15.60 mg/L,污染物通过径流裹挟进入布吉河的总量和速率降低,促使布吉河黑臭消除、水质提升至 IV 类,表明海绵城市建设可有效削减洪湖片区径流污染。这是因为“绿-灰-蓝”海绵设施耦合系统构建控制径流污染对河流水质改善具有重要影响^[32]。海绵设施对降雨径流 SS 的削减能力与降雨峰值和降雨时长有关,海绵设施表现较好时对片区径流 SS 削减率甚至高达 90%^[33-34]。经过洪湖片区海绵设施削减后的径流污染物汇入布吉河,直接影响布吉河水质。日降雨量与布吉河(洪湖片区段)当日 DO、NH₄⁺-N、COD、TP 和 SS 浓度相关性极显著($P<0.01$),表明气候变化不仅是影响洪湖片区当日地表径流量的主要因素,还是影响当日地表径流污染的主要因素。研究表明片区径流控制率与 SS 削减率的变化趋势具有很高的一致性^[35]。

海绵城市建设对微观尺度生态水文过程的影响与中观尺度存在差异,降雨量等因素与典型项目生态水文过程量化关系不明显。学校、道路和社区公园利用绿色屋顶、透水铺装等强化下渗、蒸散,可削减雨季径流 99.0%以上、削减峰值流量 97.0%以上,控制 SS 月均浓度低于 17.10 mg/L。绿色屋顶在削减径流方面功能突出,可滞留雨水 30.0 min 增加到 113.3 min^[36]。绿色屋顶可以削减 90%以上的 SS^[37],蓄水池可削减 92%以上的峰值流量^[38],绿色屋顶和雨水回用设施(含蓄水池)组合使用可高校削减雨季径流总量。透水铺装对径流总量有显著影响,与生物滞留设施结合可有效控制径流总量^[39]。这种组合方案在社区公园中应用效果更佳。透水铺装和下沉式绿地组合使用可削减 80%以上道路径流总量^[40],结合环保型雨水口,可将道路雨季径流总量削减率提升至 99.9%。综上可见源头减排设施是片区径流控制开始的地方,也是海绵城市生态基础设施网络建设的重点。

4 结论

本研究证明海绵城市确实改善了洪湖片区生态水文过程,在削减径流总量、峰值流量、积水水位和径流污染方面发挥了一定作用。虽然海绵面积(比例)和地表径流量削减无直接量化关系,但是气候变化带来的降水变化不再是影响洪湖片区地表径流总量的主要因素,间接证明海绵城市建设引起的土地利用/覆被变化可能是影响洪湖片区地表径流总量的主要因素。洪湖片区通过 28.3%(0.85 km²)海绵面积建设,减少雨季径流 97.2%,削减典型降雨峰值流量 98.2%以上,降低易涝点积水水位至 7.8 cm 以下,仅 2.8%形成河川径流(布吉河)。本研究结果表明,海绵城市中微观尺度源头减排设施和调蓄设施的耦合建设模式是一种改善相似流域生态水文过程的有效途径。

参考文献(References):

- [1] Lobanova A, Liersch S, Nunes J P, Didovets I, Stagl J, Huang S C, Koch H, del Rocío Rivas López M, Maule C F, Hattermann F, Krysanova V. Hydrological impacts of moderate and high-end climate change across European river basins. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2018, 18: 15-30.
- [2] 黄奕龙, 傅伯杰, 陈利顶. 生态水文过程研究进展. *生态学报*, 2003, 23(3): 580-587.
- [3] Shi X Y, Matsui T, Machimura T, Haga C, Hu A, Gan X Y. Impact of urbanization on the food-water-land-ecosystem nexus: a study of Shenzhen, China. *Science of the Total Environment*, 2022, 808: 152138.
- [4] Miroschny N V, Likhanov A F, Grabovska T O, Teslenko I K, Roubik H. Green infrastructure and relationship with urbanization - Importance and necessity of integrated governance. *Land Use Policy*, 2022, 114: 105941.
- [5] Shao M Q, Zhao G, Kao S C, Cuo L, Rankin C, Gao H L. Quantifying the effects of urbanization on floods in a changing environment to promote

- water security-A case study of two adjacent basins in Texas. *Journal of Hydrology*, 2020, 589: 125154.
- [6] Yin D K, Chen Y, Jia H F, Qi Wang, Chen Z X, Xu C Q, Li Q, Wang W L, Yang Y, Fu G T, Chen A S. Sponge city practice in China: a review of construction, assessment, operational and maintenance. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 280: 124963.
- [7] Zha X B, Luo P P, Zhu W, Wang S T, Lyu J Q, Zhou M M, Huo A D, Wang Z H. A bibliometric analysis of the research on Sponge City: current situation and future development direction. *Ecohydrology*, 2021, 14(7): e2328.
- [8] Lancia M, Zheng C M, He X, Lerner D N, Andrews C, Tian Y. Hydrogeological constraints and opportunities for “Sponge City” development: Shenzhen, southern China. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2020, 28: 100679.
- [9] Tirpak R A, Winston R J, Simpson I M, Dorsey J D, Grimm A G, Pieschek R L, Petrovskis E A, Carpenter D D. Hydrologic impacts of retrofitted low impact development in a commercial parking lot. *Journal of Hydrology*, 2021, 592: 125773.
- [10] Zhu Z H, Chen X H. Evaluating the effects of low impact development practices on urban flooding under different rainfall intensities. *Water*, 2017, 9(7): 548.
- [11] 彭建, 魏海, 武文欢, 刘焱序, 王仰麟. 基于土地利用变化情景的城市暴雨洪涝灾害风险评估——以深圳市茅洲河流域为例. *生态学报*, 2018, 38(11): 3741-3755.
- [12] 李帅, 魏虹, 刘媛, 马文超, 顾艳文, 彭月, 李昌晓. 气候与土地利用变化下宁夏清水河流域径流模拟. *生态学报*, 2017, 37(4): 1252-1260.
- [13] Liu Y J, Chai Y F, Yue Y, Huang Y Y, Yang Y P, Zhu B Y, Lou D, Li Y T, Shi D W, Ullah W. Effects of global greening phenomenon on water sustainability. *CATENA*, 2022, 208: 105732.
- [14] 刘颂, 赖思琪. 国外雨洪管理绩效评估研究进展及启示. *南方建筑*, 2018, (3): 46-52.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 51345—2018 海绵城市建设评价标准. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 海绵城市建设绩效评价与考核办法(试行). (2015-07-10) [2021-09-18]. <https://www.mohurd.gov.cn/file/old/2015/20150716/W020150715042911.doc>.
- [17] 李刚, 林聪, 张海龙, 刘萍. 庄河市将军湖片区海绵城市系统监测方案研究. *给水排水*, 2020, 46(6): 79-84.
- [18] 郝璐, 孙阁. 城市化对流域生态水文过程的影响研究综述. *生态学报*, 2021, 41(1): 13-26.
- [19] Butler D, Digman C, Makropoulos C, Davies J W. *Urban Drainage*. 4th ed. Boca Raton: CRC Press, 2018.
- [20] 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局. GB 3838—2002 地表水环境质量标准. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 1-2.
- [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, 2012.
- [22] 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.
- [23] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国环境保护部. 城市黑臭水体整治工作指南. (2015-08-28) [2021-09-18]. <https://www.mohurd.gov.cn/file/old/2015/20150911/W020150911050936.pdf>.
- [24] Chang H S, Su Q M. Exploring the coupling relationship of stormwater runoff distribution in watershed from the perspective of fairness. *Urban Climate*, 2021, 36: 100792.
- [25] 高晓薇, 刘家宏. 深圳河流域城市化对河流水文过程的影响. *北京大学学报: 自然科学版*, 2012, 48(1): 153-159.
- [26] 卢晓雄, 李晴岚, 陈申鹏, 张凯, 孙立群, 陈潜, 张立杰. 2008-2017 年深圳降水时空特征研究. *气象科技进展*, 2019, 9(3): 171-178.
- [27] Gong Y W, Chen Y, Yu L, Li J Q, Pan X Y, Shen Z Y, Xu X, Qiu Q Y. Effectiveness analysis of systematic combined sewer overflow control schemes in the sponge city pilot area of Beijing. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(9): 1503.
- [28] Randall M, Sun F B, Zhang Y Y, Jensen M B. Evaluating Sponge City volume capture ratio at the catchment scale using SWMM. *Journal of Environmental Management*, 2019, 246: 745-757.
- [29] Yin D K, Evans B, Wang Q, Chen Z X, Jia H F, Chen A S, Fu G T, Ahmad S, Leng L Y. Integrated 1D and 2D model for better assessing runoff quantity control of low impact development facilities on community scale. *Science of the Total Environment*, 2020, 720: 137630.
- [30] Iwasaki K, Katsuyama M, Tani M. Factors affecting dominant peak-flow runoff-generation mechanisms among five neighbouring granitic headwater catchments. *Hydrological Processes*, 2020, 34(5): 1154-1166.
- [31] Zhang Q F, Wu Z F, Tarolli P. Investigating the role of green infrastructure on urban WaterLogging: evidence from metropolitan coastal cities. *Remote Sensing*, 2021, 13(12): 2341.
- [32] Leng L Y, Mao X H, Jia H F, Xu T, Chen A S, Yin D K, Fu G T. Performance assessment of coupled green-grey-blue systems for Sponge City construction. *Science of the Total Environment*, 2020, 728: 138608.
- [33] 贺文彦, 谢文霞, 赵敏华, 赵江, 王永进, 赵洪涛, 李叙勇. 海绵城市试点区域内面源污染发生过程及其对水体污染负荷贡献评估. *环境科学学报*, 2018, 38(4): 1586-1597.
- [34] Gong Y W, Fu H Y, Li H Y, Chen Y, Zhang W, Wu L Y, Li Y H. Influences of time scale on green stormwater infrastructure's effect on suspended solids in urban rainfall runoff. *Journal of Hydrology*, 2021, 598: 126439.
- [35] Gao J Y, Li J K, Li Y J, Xia J, Lv P. A distribution optimization method of typical LID facilities for sponge city construction. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 2021, 21(1): 13-22.
- [36] Liu W, Engel B A, Feng Q. Modelling the hydrological responses of green roofs under different substrate designs and rainfall characteristics using a simple water balance model. *Journal of Hydrology*, 2021, 602: 126786.
- [37] 张千千, 王效科, 高勇, 万五星, 欧阳志云. 绿色屋面降雨径流水质及消减污染负荷研究. *生态学报*, 2015, 35(10): 3454-3463.
- [38] Son C H, Hyun K H, Kim D, Baek J I, Ban Y U. Development and application of a low impact development (LID)-based district unit planning model. *Sustainability*, 2017, 9(1): 145.
- [39] Zhu Z H, Chen Z H, Chen X H, Yu G. An assessment of the hydrologic effectiveness of low impact development (LID) practices for managing runoff with different objectives. *Journal of Environmental Management*, 2019, 231: 504-514.
- [40] 解铭, 杨智, 周杨军, 赵祥, 孙子为. 上海临港新城道路改造海绵城市设计方案. *中国给水排水*, 2020, 36(20): 137-142.