

DOI:10.11918/202005015

流域尺度视角下海绵城市建设途径及区域径流控制

贺弋桓¹,王建龙^{1,2},仝贺¹,赵梦圆¹

(1. 城市雨水系统与水环境教育部重点实验室(北京建筑大学),北京 100044;
2. 北京建筑大学 北京市可持续城市排水系统构建与风险控制工程技术研究中心,北京 100044)

摘要: 随着城市化的快速发展,城市不透水区域面积逐年增加,导致城市洪涝风险加剧、径流污染负荷增加等突出雨水问题,也给流域的水安全及水环境带来严重影响. 针对上述问题,近年来基于流域管理的城市雨水管理模式得到快速发展. 通过流域尺度城市单元土地开发前后峰值流量和雨水径流污染负荷变化的分析,提出以受纳水体过流能力和水环境自净容量为约束条件的流域尺度海绵城市建设管控方法,建立基于水量、水质总量控制为主要目标的多层级雨水径流控制方法,构建流域-城市尺度的场地可持续开发雨水管理模式,并以某开发区为例,分析区域径流总量控制、径流峰值削减及径流污染控制等目标的实施途径,以为未来流域管理和海绵城市建设的统筹协调提供支撑.

关键词: 流域管理;水文;多层级调蓄;海绵城市;雨水管理

中图分类号: TU992 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2021)05-0072-07

Approaches and strategies of sponge city development based on watershed management

HE Yihuan¹, WANG Jianlong^{1,2}, TONG He¹, ZHAO Mengyuan¹

(1. Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment(Beijing University of Civil Engineering and Architecture), Ministry of Education, Beijing 100044, China;2. Beijing Engineering Research Center of Sustainable Urban Sewage System Construction and Risk Control, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: With the development of urbanization, the urban impervious area has increased rapidly, leading to serious rainwater problems such as the increased risk of urban flooding and runoff pollution. Meanwhile, there has also been severe impact on water safety and water environment at watershed scale. Therefore, the urban stormwater management model based on watershed management has developed rapidly in recent years. By analyzing the changes in the peak flow rate and the pollution load of the stormwater runoff before and after the development of the urban land, a management and control method for sponge city construction was put forward at basin scale, which was constrained by the peak flow rate of the flooding way and the self-purification capacity of the water environment. A multi-level stormwater control approach was put forward based on water quantity and quality control, and the stormwater management model of land sustainable development was proposed at the watershed-urban scale. Taking a development area as an example, the construction approaches of regional total runoff volume control, peak flow rate reduction, and runoff pollution control were analyzed, aiming at providing support for the overall coordination of watershed management and sponge city construction in the future.

Keywords: watershed management; hydrology; multi-stage detention; sponge city; stormwater management

流域管理是以流域为单元,合理安排农业、林业、牧业、副业等各类用地,通过跨部门、跨地区的多学科、多需求、多元化的科学管控,对流域内水土及其他自然资源进行保护、改善与合理利用,以达到充分发挥流域内水土及其他自然资源生态效益、经济效益、社会效益的目的^[1-3]. 早期流域管理主要包括流域水资源的开发规划、工程建设及利用管理,

20 世纪 90 年代,中国提出以水资源保护、水生态修复及水安全防护等目标的流域统筹管理理念^[4]. 并在此基础上形成了现代流域管理以水体健康、污染控制、生态保护、防洪排涝和资源利用为目标的管理体系^[5-6]. 近年来,随着中国各类土地用地类型的快速变化与发展,区域水文循环过程发生变化,使得流域水安全风险增加、水环境质量降低. 赵钟楠等^[7]通过分析流域尺度内城市开发对流域整体的具体补偿及综合补偿的辩证统一关系,提出了城市开发对流域尺度所带来的生态破坏的补偿理论和方法. 张利超等^[8]提出小流域水土保持治理中蓄水池的重

收稿日期: 2020-05-03
基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07103-002)
作者简介: 贺弋桓(1994—),女,硕士研究生;
王建龙(1978—),男,教授
通信作者: 王建龙, wjl_xt@163.com

要性,并针对鄱阳湖流域建设提出了蓄水池设计标准,如工程布置、容量计算、工程设计的安全性等. Sun 等^[9]提出流域内地表径流对水生态系统破坏最严重,并针对水污染和水资源问题提出封闭保护、雨水(污水)收集和径流调节三项管理措施.

随着城市的快速发展,城市建成区面积急剧增加,建成区下垫面径流系数一般从开发前的 0.2 ~ 0.3 增加至开发后的 0.6 ~ 0.7,相同重现期条件下,开发后峰值流量约为开发前的 3 倍^[3];其次,天然河道及滞洪洼地被填埋挤占,城市原有的蓄渗空间日益减少,雨水汇流时间缩短,峰值时间提前,峰值流量明显增加,导致洪涝风险增大^[10]. 在流域尺度视

角下,上游城市的雨水径流外排流量增大,造成下游河道高水位,形成河道顶托现象. 下游城市雨水无法通过重力流排入行洪河道,甚至发生河水倒灌现象,从而给流域下游城市带来安全隐患(如图 1). 此外,降雨期间雨水径流中携带的各种污染物最终都排入受纳水体,给受纳水体带来冲击性污染,因此,城市化的发展导致降雨期间受纳水体的水位升高、流速增大、水质恶化,加剧了流域洪涝风险,降低了水环境质量,破坏了流域原有的水文循环过程. 针对上述突出的城市内涝与城市河道污染问题,国内提出了海绵城市建设理念,并逐步在城市土地开发建设中得到广泛应用^[11-13].

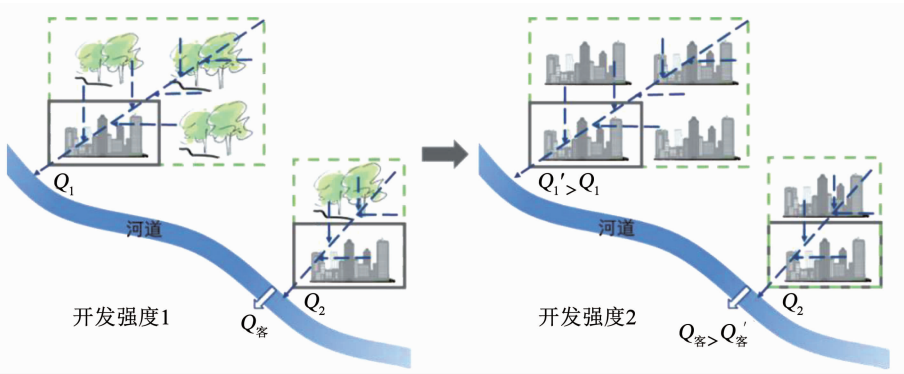


图 1 城市开发建设对流域水文过程的影响

Fig. 1 Influence of urban development and construction on hydrological process of watershed

海绵城市建设以雨水的综合控制利用为主要目标. 在城市的规划设计及建设过程中,以汇水或排水分区为基本的单元将建设区域划分为多个控制地块,通过识别不同地块的场地条件及突出雨水问题,确定相应的雨水径流控制目标与指标^[14]. 但对于流域的水文平衡来讲,只注重单一区域的雨水管理指标或单元排水分区内的指标,而忽视了流域中不同城市或排水分区之间在雨水控制利用方面的相互衔接及影响,难以达到区域的整体控制及平衡. 因此,流域可持续水文循环系统构建,需要从流域层面统筹考虑不同城市或排水分区之间的相互衔接关系及上下游的统筹管理^[15]. 因此,本文通过分析城市化发展对流域水文过程的影响,探讨了基于流域尺度的城市雨水管理体系,系统评估城市化对流域水文循环过程的影响,并将此理念与国内海绵城市建设有机结合,提出基于水量、水质多目标控制的流域尺度雨水管控途径,以期为流域可持续水循环系统构建和海绵城市建设提供支撑.

1 基于流域尺度的海绵城市建设途径

1.1 城市化对水文过程的影响

通过上述分析可知,若要实现流域尺度可持续水文循环过程,应对流域内不同城市或排水分区间的雨水径流响应机理进行系统研究,根据城市上、下游关系,统筹雨水排放安全管理. 而如何将流域管理理念与城市建设相结合,将流域目标细化至城市尺度仍是目前流域管理重点研究内容之一^[16]. 一般认为,城市场地开发会给区域带来外排径流总量和峰值流量的增加,并使得场地径流峰值时间提前. 因此,在城市开发建设过程中为减轻场地开发对区域水文过程变化的影响,应采取海绵城市建设等有效的措施控制场地开发后带来的不利水文影响,具体内容包括雨水径流外排总量控制、峰值流量削减、峰值时刻延迟、雨水径流污染负荷削减等. 场地开发前后水文过程线变化如图 2 所示,可以看出,通过海绵城市建设可有效缓解场地开发后对水文过程的影响^[17].

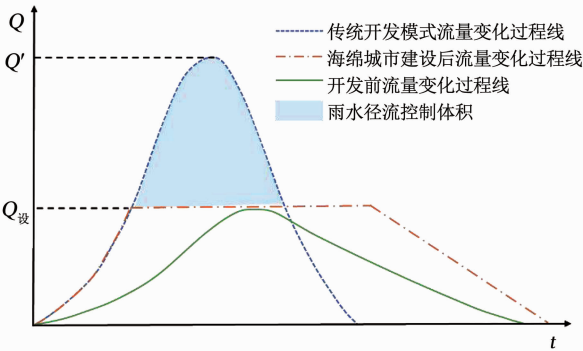


图 2 场地开发前后径流过程线

Fig. 2 Hydrograph of the site before and after development

为有效控制城市开发建设对水文参数的不利影响,实现雨水径流水量水质多目标控制,应根据海绵建设的理念,在排水分区单元,首先遵循不透水面积最小化的原则,通过场地源头促渗减排措施削减雨水径流外排总量,并根据雨水径流污染物冲刷特征,采取生物滞留、环保雨水口等措施有效控制雨水径流污染,在末端排口采用雨水塘/湿地等调蓄设施削减雨水径流峰值,从而实现场地开发后水文特征参数影响最小化^[18]. 在流域尺度应根据受纳水体的行洪能力和自净容量,提出各个排口的雨水径流外排总量、峰值流量和雨水径流污染负荷控制目标,从而作为各个城市海绵城市建设目标和指标的要求. 然后,进一步根据雨水管网分区组成,逐级计算出上游各个排水单元的雨水径流量、水质控制要求,并纳入相应规划管控指标体系,形成基于流域管理的城市径流分担理念(见图 3). 对于已建区域,应在城市更新改造过程中,以问题为导向,结合积水点改造、合流制溢流污染控制、管网提质增效等项目,采取灰、绿结合的措施,逐步实现雨水径流量、水质多目标控制^[19].

1.2 基于流域管理的海绵城市建设途径

流域管理是以流域为单元的综合管理计划,其在实施过程中综合考虑了雨水径流对河湖水岸安全,以及汇水区域水体涵养等多个目标,并进一步落实为流域综合管理规划. 在流域综合管理规划中,依据流域范围内的城市、河道及雨水的汇流范围,可将流域划分为多个汇水分区,并根据河道的最大安全水位计算其流域最大行洪排放能力,确定沿岸各城市开发建设后的最大排水量,即为城市尺度的控制流量,并进一步确定城市排水分区尺度的雨水径流控制目标,从而构建从源头到末端的全流程管控体系. 在城市-排水分区尺度,以末端排口允许的最大排放流量和径流污染负荷为主要控制目标,综合考虑雨季防洪排涝安全等因素,对已建和新建项目进行统筹管理. 采用水文评估—方案制定—方案评

估—建设后评估—评估后更新的建设途径,以河道允许的最大行洪能力为边界条件,确定城市建设区域面积和开发边界、雨水控制利用设施规模和地块开发强度等因素. 基于流域管理的海绵城市建设应结合场地实际情况统筹考虑流域内水安全、水生态、水环境、水资源等目标,以河道的最大行洪能力和水环境容量为约束条件,以河道为脉,以排水为支,实现年径流总量控制率、雨水峰值外排量及径流污染负荷等指标的有效控制,构建源头、中途、末端全流程的雨水综合控制利用途径. 具体实施过程中可根据城市定位及开发建设目标,从流域尺度结合用地类型和各管控单元的开发强度合理分配总量控制、峰值控制及径流污染控制指标,因地制宜地遴选适宜的技术措施,保障流域整体的实施效果. 综上,基于流域管理的海绵城市建设途径见图 4. 可以看出,在流域管理径流分担目标约束条件下,城市尺度内海绵城市建设应基于总排口控制目标,从源头到末端实现雨水径流的多层级控制. 在场地源头采用透水铺装、下凹式绿地等措施,并根据土地利用类型,实现雨水径流的促渗减排,具体包括渗透补给地下水、雨水径流污染控制、雨水收集利用等. 中途控制以排水管渠、泵站能力提升为主要目标,同时兼顾水质控制需求,采用环保雨水口、旋流沉砂、调蓄池等措施,实现雨水径流的安全有序传输和排放. 在末端以水量、水质多目标控制为主,通过雨水塘、雨水湿地、大型调蓄设施等措施,实现整个排水区域的水量和水质综合控制目标,从而满足基于流域管理的径流分担目标要求.

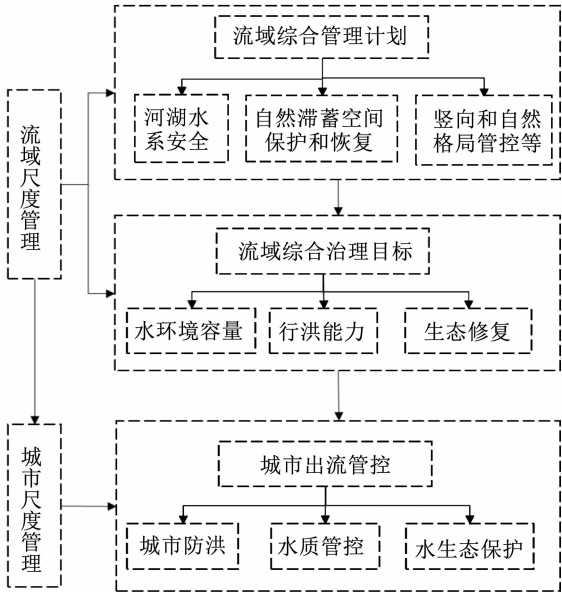


图 3 流域—城市尺度雨水管理响应关系

Fig. 3 Composition of watershed-urban management system

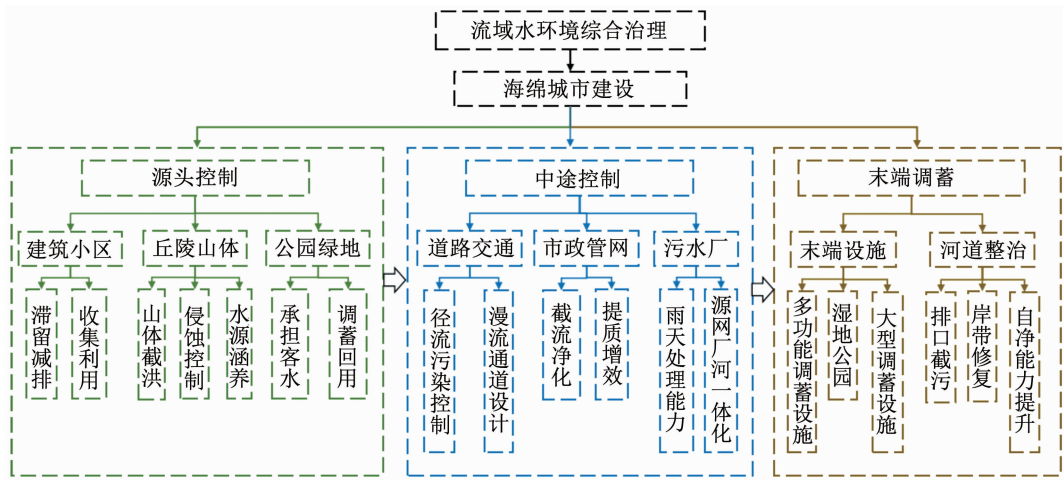


图 4 基于流域管理海绵城市建设途径

Fig.4 Flow chart of sponge city construction based on watershed management

2 案例分析

2.1 项目概况

以某开发区域 A 为例(下文统称区域 A),通过分析该片区开发建设后对流域水文参数的影响,提出了基于流域管理的海绵城市建设方案.区域 A 总体地势为四周高中间低,由东南向西北方向倾斜,如图 5(a)所示,片区内高程在 140 ~ 570 m.片区位于流域上游位置,内有一条行洪河道.区域 A 年平均降雨量为 665 mm,总用地面积为 21.1 km²,用地类

型包括商业、居住、公园绿地、生态保护区,如图 5(b)所示,区域 A 开发后综合径流系数为 0.30.开发建设区域(商业用地和居住用地)占地面积为 4.5 km²,约占区域总面积的 18.95%,且处于地势低点,场地综合径流系数为 0.55.由于区域 A 位于流域上游,其土地开发后对下游河道行洪能力和水质将产生较大影响.因此,在土地开发建设过程中从径流总量、径流峰值及径流污染方面对雨水径流进行有效控制.

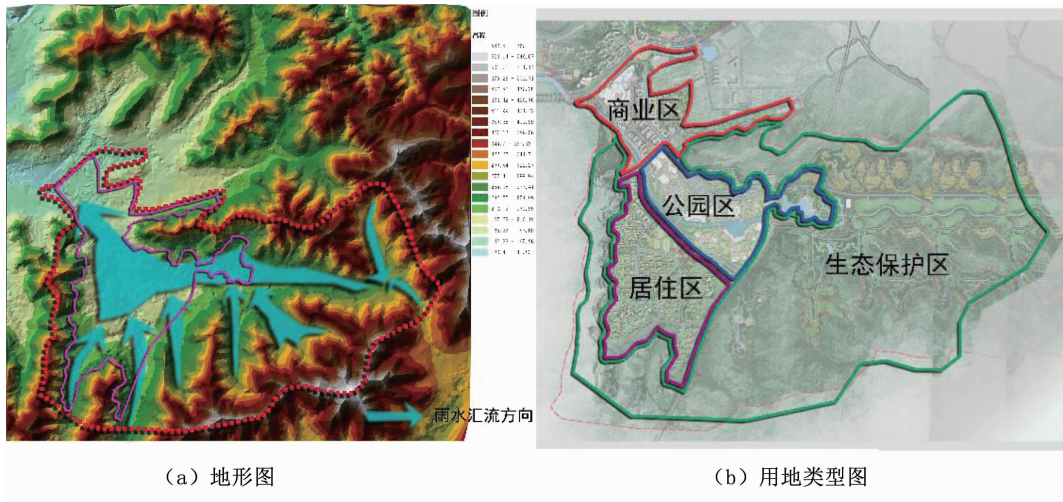


图 5 区域 A 地形图及用地类型

Fig.5 Topographic map and land use type of area A

2.2 海绵城市建设方案

针对区域 A 场地特点和开发前后水文参数量化评估结果,提出以“蓄、渗”为主,兼顾“净、用、滞、排”等功能需求的海绵城市建设方案.结合片区内上游山体、建筑与小区、城市道路、绿地与广场、河流水系等下垫面情况,借助经济技术分析,优选技术措施及其布局,通过合理布置低影响开发措施,构建源

头减排系统、中途转输过程控制系统及末端雨水调蓄排放系统,实现区域 A 雨水“自然积存、自然渗透、自然净化”的海绵功能,具体方案示意图 6.依据各功能分区的实际情况,分别制定海绵城市建设途径,具体如下:

1)商业区,以雨水收集回用为主.通过在商业区等公共建筑附近设置雨水收集、蓄渗设施,将商业

区内建筑屋顶、广场的雨水进行收集回用和蓄渗。

2) 居住区,以雨水源头减排为主。居住区是雨水径流的主要来源之一,且居住区绿化条件较好,可以通过在居住区构建一整套源头促渗减排系统,实现雨水的源头促渗减排。

3) 公园区,以雨水净化调蓄为主。公园区位于河道的两岸、水库的下游,该片区的多个雨水管网出口都在公园区里接入末端河道,且公园区地势低洼。因此,结合中心公园功能需求,设置雨水湿地系统,对雨水进行末端调蓄、净化及下渗。

4) 生态保护区,以水源涵养为主。生态保护区为非建设用地,且位于区域 A 建设区域的上游,是主要水源涵养区。因此,结合山体、河道等构建鱼鳞坑、拦蓄坝等雨水拦截调蓄设施,增加对山体水源的涵养及下渗能力,同时减少下游雨洪压力。

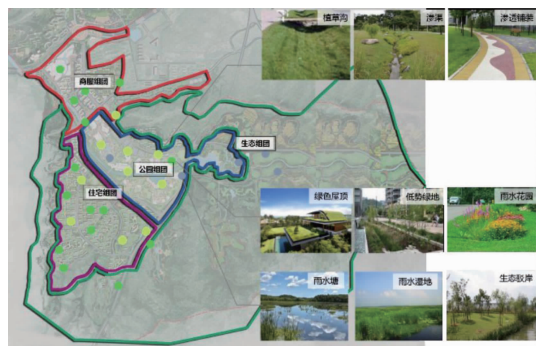


图 6 区域 A 海绵城市建设方案

Fig. 6 Sponge city construction plan of area A

2.3 径流总量控制

区域 A 场地面积为 21.1 km^2 ,场地开发前下垫面主要为山体及绿地,综合径流系数为 0.23。而在场地开发后,由于商业区、居住区及公园区的建设,区域硬化面积增加,场地综合径流系数变为 0.30。根据计算,区域 A 开发建设前后年雨水径流总外排量分别为 3.227×10^6 和 $4.209 \times 10^6 \text{ m}^3$,场地开发后年雨水径流外排增加量为 $9.82 \times 10^5 \text{ m}^3$,如图 7 所示。

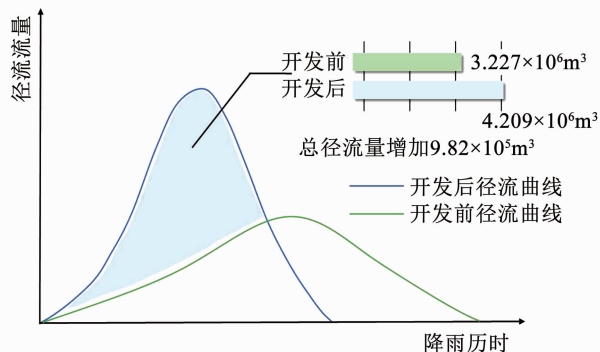


图 7 区域 A 场地开发前后场地径流过程线

Fig. 7 Runoff hydrograph changes before and after site development of area A

基于场地径流总量控制目标,考虑通过海绵城市建设对场地开发后所带来的径流增量进行控制。根据开发前的场地条件,以年径流总量控制率 77% 作为海绵城市建设目标,对应设计降雨量为 22.7 mm 。新开发建设区域以目标为导向,通过“源头、中途、末端”的全流程管控,将各项控制指标落实到各工程项目中,以满足海绵城市建设目标要求。77% 年径流总量控制率对应的雨水径流控制容积为 $5.62 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

2.4 径流峰值削减及峰值延迟

为保证区域 A 开发建设对流域水文的干扰最小化,实现区域 A 场地开发后雨水径流峰值及总量不大于场地开发前的建设目标,首先采用合理化公式对区域建设后峰值流量进行计算。当地暴雨强度公式为

$$q = 167 \times \frac{8.51(1 + 0.932 \lg P)}{(t + 7.347)^{0.617}} \quad (1)$$

式中: q 为单位面积峰值流量, $\text{L}/(\text{s} \cdot \text{hm}^2)$; P 为设计降雨重现期, a ; t 为汇流时间, min 。

根据开发区域控制性详细规划要求,区域 A 山区排洪河道对应防洪标准为 50 a。根据本研究区域场地面积较小、位于山地丘陵地带的特点,参照加州铁路局提出的^[20] 汇流时间计算公式

$$t = (0.871 L^3 \Delta H^{-1})^{0.385} \quad (2)$$

式中: L 为雨水汇流长度, m ; ΔH 为研究区域场地高差, m 。

研究区域场地自然标高在 $140 \sim 570 \text{ m}$,场地高差为 430 m 。雨水汇流长度约为 7000 m ,则根据式(2)有

$$t = (0.871 \times 7000^3 \times 430^{-1})^{0.385} = 2535.8 \text{ s} = 42.26 \text{ min}.$$

进而可以计算得到单位面积峰值流量 q 为

$$q = 167 \times \frac{8.51(1 + 0.932 \lg 50)}{(42.26 + 7.347)^{0.617}} = 330.17 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{hm}^2).$$

根据合理化公式,进一步计算出研究区域的峰值流量为

$$Q = \varphi \times F \times q. \quad (3)$$

式中: Q 为峰值流量, m^3/s ; φ 为径流系数; F 为面积, hm^2 ; q 为暴雨强度, $\text{L}/(\text{s} \cdot \text{hm}^2)$ 。

经计算,场地开发前峰值流量为 $160.23 \text{ m}^3/\text{s}$,开发后峰值流量为 $208.99 \text{ m}^3/\text{s}$ 。为保证区域 A 的开发建设不会对流域下游造成影响,实现场地开发后 50 a 峰值流量不大于开发前的建设目标,需建设雨水调蓄设施对降雨形成的峰值径流量进行控制,调蓄设施容积计算参照《城镇雨水调蓄工程技术规范》^[21] 中以下计算公式:

$$V=\left[-\left(\frac{0.65}{n^{1.2}}+\frac{b}{t}\times\frac{0.5}{n+0.2}+1.10\right)\times\right.\\ \left.\log(a+0.3)+\frac{0.215}{n^{0.15}}\right]\times Q_i\times t. \quad (4)$$

式中: Q_i 为调蓄设施上游设计流量(开发后流量), m^3/s ; b 为暴雨强度公式参数; t 为降雨历时, min ; a 为脱过系数,取值为调蓄设施场地开发前和开发后流量之比。

经计算区域 A 所需雨水调蓄设施规模为 $8.78\times10^4\text{ m}^3$ 。对于本案例,仅靠末端调蓄来落实控制指标,存在项目投资费用高、设施利用率低等问题。因此,在项目建设过程中可将雨水综合控制指标作为约束条件,将流域管理与海绵城市建设相结合,构建从源头到末端的全流程管控体系。本区域通过海绵城市建设共形成 $5.62\times10^4\text{ m}^3$ 的调蓄容积,利用自然山体截洪沟和沟谷拦蓄可形成 $2.5\times10^4\text{ m}^3$ 的调蓄容积。因此,将流域管理与海绵城市相结合时,只需考虑在河道末端设置规模为 $6.6\times10^3\text{ m}^3$ 的调蓄容积即可满足目标要求。对于末端调蓄设施,可优先考虑采用雨水湿地、雨水塘等地表调蓄形式,并可与景观水体设计结合考虑。

2.5 径流污染控制

为实现径流污染控制目标,应综合考虑河道自净容量及场地径流污染排放负荷。根据该项目区域河道自净能力及污染物扩散能力计算可知,该区域 SS 净化容量为 101.8 t/a 、COD 净化容量为 75.6 t/a 。

区域 A 建成区存在过度硬化、污染负荷较高等问题,降雨时污染物随雨水径流进入河道,造成了受纳水体污染。以 SS 和 COD 为例,研究区域 A 不同下垫面组成及典型降雨条件下污染物平均浓度如表 1 所示。

表 1 区域 A 建成区不同下垫面污染物平均浓度
Tab. 1 Average concentrations of pollutants on different underlying surfaces of built-up area A

下垫面类型	面积/ km^2	综合径 流系数	SS/ $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	COD/ $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$
建筑	1.93	0.85	76.95	58.88
道路	0.72	0.80	140.26	95.09
绿地	1.85	0.15	65.31	57.05

根据表 1 中参数取值,采用雨水径流年污染负荷评估的方法,计算得到区域 A 开发建设后不同下垫面年污染负荷,建筑屋面 SS 排放量为 83.9 t/a 、COD 排放量为 64.2 t/a ;道路 SS 排放量为 53.7 t/a 、COD 排放量为 36.4 t/a ;绿地 SS 排放量为 12 t/a 、COD 排放量为 11 t/a 。若保证区域 A 开发后,排入

河道污染负荷不超过其开发前的自净容量,区域 A 雨水径流污染物控制率应达到 32%,即 SS 控制量不低于 44.4 t/a 、COD 控制量不低于 32.5 t/a 。区域 A 海绵城市建设中年径流总量控制率为 77%,根据《海绵城市建设技术指南》^[22] 污染物削减率计算方法,对应污染物削减率约为 45%,可满足区域雨水径流污染物控制目标。

3 结论与展望

通过量化评估城市化开发建设对流域水文参数的不利影响,提出了基于末端受纳水体行洪能力和水环境容量为约束条件的流域尺度海绵城市建设模式,从维持流域水文平衡的角度提出了城市尺度雨水管理规划设计管控要求,并将流域管理与海绵城市建设相结合,具体实施途径为:水文评估—方案制定—方案评估—建设后评估—评估后更新。海绵城市建设应以构建流域尺度可持续水文循环过程为根本目标,尊重城市发展规律,保护自然生态系统。在城市尺度应因地制宜、经济高效地确定海绵城市建设方案,通过源头减排、过程控制和末端调蓄全流程管控途径,实现雨水径流量、水质的多目标控制。保护和恢复流域可持续水文循环过程,应坚持量质并重,走向精细管理,坚持多元动力,仍需要在今后实践过程中不断探索创新。

参考文献

[1] HUGHES R M, WHITTIER T R, ROHM C M, et al. A regional framework for establishing recovery criteria [J]. Environmental Management, 1990, 14(5): 673. DOI: 10.1007/bf02394717

[2] 郭索彦. 基于生态文明理念的水土流失补偿制度研究[J]. 中国水利, 2010(4): 19

GUO Suoyan. Study on the compensation system for soil erosion and water loss based on the concept of ecological civilization[J]. China Water Resources, 2010(4): 19

[3] BAILEY R G. Delineation of ecosystem regions[J]. Environmental Management, 1983, 7(4): 365. DOI: 10.1007/BF01866919

[4] 王秉杰. 现代流域管理体系研究[J]. 环境科学研究, 2013, 26(4): 457

WANG Bingjie. Research on modern watershed management system [J]. Research of Environmental Sciences, 2013, 26(4): 457

[5] 应力文, 刘燕, 戴星翼, 等. 国内外流域管理体制综述[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(163): 175

YING Liwen, LIU Yan, DAI Xingyi, et al. A review of watershed management system at home and abroad [J]. China Population Resources and Environment, 2014, 24(163): 175

[6] 王秉杰. 流域管理的形成、特征及发展趋势[J]. 环境科学研究, 2013, 26(4): 452

WANG Bingjie. Research on formations, characteristics and development trend of watershed management [J]. Research of Environmental Sciences, 2013, 26(4): 452

[7] 赵钟楠, 李原园, 郑超惠, 等. 基于复杂系统演化理论的河流行

- 态修复概念与思路研究[J]. 中国水利, 2018(21): 18
- ZHAO Zhongnan, LI Yuanyuan, ZHENG Chaohui, et al. Studies on concepts and approaches of river ecosystem recovery based on complex system evolution theory[J]. China Water Resources, 2018(21): 18. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2018.21.015
- [8] 张利超, 谢颂华, 喻荣岗, 等. 小流域治理中蓄水池工程设计探讨[J]. 人民长江, 2019, 50(1): 148
- ZHANG Lichao, XIE Songhua, YU Ronggang, et al. Discussion on engineering design of cisterns in small watershed management[J]. Yangtze River, 2019, 50(1): 148. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2019.01.027
- [9] SUN Yun, HAO Ruifang, QIAO Jianmin, et al. Function zoning and spatial management of small watersheds based on ecosystem disservice bundles[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 255: 120285. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120285
- [10] 王建龙, 车伍, 易红星. 基于低影响开发的城镇雨洪控制与利用方法[J]. 中国给水排水, 2009, 25(14): 6
- WANG Jianlong, CHE Wu, YI Hongxing. Low impact development for urban stormwater and flood control and utilization[J]. China Water & Wastewater, 2009, 25(14): 6. DOI: 10.3321/j.issn:1000-4602.2009.14.002
- [11] 张爱玲, 宫永伟, 印定坤, 等. 济南历阳河流域海绵城市建设的水文效应分析[J]. 中国给水排水, 2018, 34(13): 135
- ZHANG Ailing, GONG Yongwei, YIN Dingkun, et al. Hydrological effect analysis for sponge city construction in Liyang River watershed of Jinan, China[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(13): 135
- [12] 袁媛. 基于城市内涝防治的海绵城市建设研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016
- YUAN Yuan. Study on construction of sponge city based on city waterlogging prevention[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016
- [13] 车伍, 赵杨, 李俊奇, 等. 海绵城市建设指南解读之基本概念与综合目标[J]. 中国给水排水, 2015, 31(8): 1
- CHE Wu, ZHAO Yang, LI Junqi, et al. Explanation of sponge city development technical guide: Basic concepts and comprehensive goals[J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(8): 1
- [14] 李宇超. 海绵城市建设的理论与实践——以西咸新区海绵城市建设为例[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016
- LI Yuchao. Research on the theory and practice of “sponge city”: Case study on the theory and practice of sponge city in the Xixian new area[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2016
- [15] 吴丹洁, 詹圣泽, 李友华, 等. 中国特色海绵城市的新兴趋势与实践研究[J]. 中国软科学, 2016(1): 79
- WU Danjie, ZHAN Shengze, LI Youhua, et al. New trends and practical research on the sponge cities with Chinese characteristics[J]. China Soft Science, 2016(1): 79. DOI: 10.3969/j.issn.1002-9753.2016.01.008
- [16] 车伍, 桑斌, 刘宇, 等. 城市雨水控制利用标准体系及问题分析[J]. 中国给水排水, 2016, 32(10): 22
- CHE Wu, SANG Bin, LIU Yu, et al. Analysis on standards for urban stormwater management and some problems[J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(10): 22
- [17] 雷雨. 基于低影响开发模式的城镇雨水控制利用技术体系研究[D]. 西安: 长安大学, 2012
- LEI Yu. Under the urban rainwater control technology system research based on low-impact development pattern[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012
- [18] 王建龙, 王明宇, 车伍, 等. 低影响开发雨水系统构建关键问题探讨[J]. 中国给水排水, 2015, 31(22): 6
- WANG Jianlong, WANG Mingyu, CHE Wu, et al. Discussion on key issues in construction of stormwater drainage system based on low impact development[J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(22): 6
- [19] 李俊奇, 张哲, 李晓晨, 等. 峰值流量和径流污染联合控制的延时调节设施设计方法探析[J]. 环境工程, 2019, 37(7): 57
- LI Junqi, ZHANG Zhe, LI Xiaochen, et al. Design procedure for extended detention facility with peak flow regulation and runoff pollution control[J]. Environmental Engineering, 2019, 37(7): 57. DOI: 10.13205/j.hjgc.201907011
- [20] California Division of Highways (CDH). California culvert practice[M]. Sacramento, CA: Division of Highways, 1960
- [21] 城镇雨水调蓄工程技术规范: GB 51174—2017[S]. 北京: 中国计划出版社, 2017
- Technical code for urban stormwater detention and retention engineering: GB 51174—2017[S]. Beijing: China Planning Press, 2017
- [22] 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
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical guidelines for sponge city construction: Low impact development of rainwater system construction (trial)[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015

(编辑 刘 彤)