

北方城市海绵社区生态效益分析

李晨^{1,2}, 王桂锋³, 张传杰¹, 赵冰清^{1,2}, 牛勇¹

(1. 山东农业大学 林学院, 山东 泰安 271018; 2. 北京奥特美克科技股份有限公司, 北京 100085; 3. 北京市怀柔区水务局, 北京 101400)

摘要: [目的] 分析海绵社区建设带来的经济效益、生态效益, 为中国海绵城市建设提供技术参考。[方法] 以北京市通州区某建筑小区为研究对象, 通过增设屋顶绿化、下凹式绿地、雨水调蓄池等雨水渗蓄措施, 对比增设设施前后外排量、节水量、回补地下水量、消除污染而减少的社会损失量、节电量、固碳释氧量的变化。[结果] 研究区增设雨水调蓄设施后, 年单位面积总效益增加量为 38 566 元/(hm²·a), 年单位面积节约中水量为 208 m³/(hm²·a), 年单位面积节电量为 145 (kW·h)/(hm²·a), 年单位面积回补地下水增加量为 281 m³/(hm²·a), 年固碳增加量为 0.02 t/(hm²·a), 年固氧增加量为 0.01 t/(hm²·a)。[结论] 采用雨水调蓄设施, 在节水、节能、截污等方面均可产生具有明显的经济效益和生态效益, 值得大力推广和提倡。

关键词: 海绵社区; 雨水利用; 效益分析; 调蓄

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)03-0119-06

中图分类号: TV213.9

文献参数: 李晨, 王桂锋, 张传杰, 等. 北方城市海绵社区生态效益分析[J]. 水土保持通报, 2017, 37(3): 119-124. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.03.021; Li Chen, Wang Guifeng, Zhang Chuanjie, et al. Analysis on ecological benefits of sponge community in northern cities[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(3): 119-124. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.03.021

Analysis on Ecological Benefits of Sponge Community in Northern Cities

LI Chen^{1,2}, WANG Guifeng³, ZHANG Chuanjie¹, ZHAO Bingqing^{1,2}, NIU Yong¹

(1. College of Forestry, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271001, China; 2. Beijing Automatic Science & Technology Co., Ltd, Beijing, 100085, China; 3. Huairou District of Beijing Water Authority, Beijing 101400, China)

Abstract: [Objective] To provide technical reference for the construction of sponge community in northern city, the paper analyzed the effects of economic and ecological benefits from sponge community construction. [Methods] A residential district was studied to support the sponge community construction in Tongzhou District of Beijing. To examine the benefits of rainwater storage facilities, the paper analyzed the consequent effects of several measures in the case of sponge community construction, e. g., increasing green roof, concaving green land and constructing rainwater storage tank. The effects, mainly referring to the amounts of excluding rainwater, saving water, groundwater recharge, reducing social loss for eliminating pollution, saving electricity, and the amounts of carbon fixation and oxygen release were compared to the ones of no measures taken. [Results] The total benefit of the increasing amount of per unit area was 38 566 yuan/(hm²·a) after adding rainwater storage facilities. The amount of saving water was 208 m³/(hm²·a). The amount of saving electricity was 145 (kW·h)/(hm²·a). The increasing amount of groundwater recharge was 281 m³/(hm²·a). The increasing amount of carbon fixation was 0.02 t/(hm²·a). The increasing amount of oxygen release was 0.01 m³/(hm²·a). [Conclusion] It is worth promoting and advocating to add the rainwater storage facilities for its obvious economic and ecological benefits in terms of water saving, electricity saving and sewage interception.

Keywords: sponge community; rainwater utilization; benefit analysis; regulation and storage

随着城市化进程加快, 以及全球气候变暖不断加剧, 城市的水文环境也发生了巨大变化。城市建设造成了大量不透水下垫面, 打破了原有自然条件下的水文过程, 例如地表径流增加、汇水时长缩短、洪峰提

收稿日期: 2017-03-16

修回日期: 2017-03-23

资助项目: 山东省自然科学基金项目“半干旱半湿润地区城市绿地节水与降温效应机制研究”(ZR2016DB12)

第一作者: 李晨(1989—), 男(汉族), 山西省临汾市人, 硕士, 主要从事水土保持规划、监测工作。E-mail: lichenjisuanji@126.com。

通讯作者: 牛勇(1984—), 男(汉族), 山东省菏泽市人, 博士, 讲师, 从事生态水文, 水土流失防治等方面的研究。E-mail: 150401973@qq.com。

前、峰量加大,并由此导致城市内涝问题严重^[1]。在中国,城市缺水困境与内涝风险并存^[2]。据住建部资料显示,2007—2015年,全国超过360个城市遭遇内涝,其中1/6单次内涝淹水时间超过12h,淹水深度超过0.5m,与此同时全国约有1100个城市严重缺水,水资源时空分布严重错位^[3]。在此背景下,国内开始了对城市雨水调蓄技术的讨论与专题研究。2012年4月,在深圳《2012低碳城市与区域发展科技论坛》上,“海绵城市”的概念首次提出;2013年12月,在《中央城镇化》会议中,政府领导层正式提出要建设海绵城市,将城市雨水作渗蓄利用;2014年12月,住建部、财政部等联合发文支持海绵城市建设试点工作;2015年初,全国遴选出16个海绵城市建设试点城市,至此海绵城市建设工作全面展开^[4]。北京市作为全国首批海绵城市建设试点城市之一,在雨水调蓄技术规范制订、雨水调控设施建设等方面处于全国领先地位^[5]。近年,随着北京市雨水调控设施建设的推广力度不断加大,北京市多数新建建筑小区已配建雨水调控设施。建筑小区作为城市的重要单元,其对城市水文过程具有重要的影响。但在建筑小区尺度上,有关雨水调蓄设施效益计算和评价的研究鲜有报道,无法满足海绵城市建设深入推进的需要。本研究拟以北京市某建筑小区为例,对其雨水调控措施所带来的经济效益和生态效益进行计算与评价,相关成果可以为推动中国海绵城市技术在城市开发建设中的发展和应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本文以北京市某典型建筑小区作为研究区,研究区位于北京市通州区梨园镇,为居住类社区。属暖温带大陆性季风气候区,多年平均降水量525mm,无霜期208d,年均气温11.5℃,年均日照时数2730h,大于10℃积温4200℃,最大冻土深度80cm。研究区处于暖温带落叶阔叶林带,植被类型主要以人工植物类型为主,主要植物资源中乔木有毛白杨、龙爪槐、国槐、垂柳、枣树、果树等;灌木有冬青、紫穗槐、小叶黄杨等;草本有狗尾草、针茅、高羊茅、紫花地丁等。土壤质地多为潮黄土,质地适中。

研究区总用地面积约27.54hm²,其中建设用地面积18.61hm²,代征道路面积为7.89hm²,代征绿地面积为1.04hm²。代征用地代征不代建。本研究仅针对建设用地范围内的雨水利用进行效益分析研究,不包含代征用地。建设用地可分为5个地块,分别为A、B、C、D、E区,其中A区占地面积4.02hm²,

B区占地3.40hm²,C区占地3.40hm²,D区占地3.96hm²,E区占地2.76hm²。总建筑面积4.52×10⁵m²,其中地上建筑面积3.52×10⁵m²,地下建筑面积9.98×10⁴m²,建筑密度17.83%,容积率1.89,绿化率33.15%。

1.2 雨水调蓄工程方案设计

1.2.1 雨水调蓄设施设计方案 雨水调蓄设施基于“渗、滞、蓄、净、用、排”的海绵城市生态排水理念^[6],利用地形、地貌等条件,设计为屋顶绿化、下凹式绿地、透水铺装、调蓄池等调蓄设施。具体设施设计及参数如下。

(1) 屋顶绿化。共设计屋顶绿化0.08hm²,位于D区配套公建屋顶,屋顶绿化形式采用简单式屋顶绿化。屋顶绿化的剖面结构从下往上依次为普通防水层、防水保护层、耐根穿刺层、排蓄水层、过滤层、基质层、植被层。防水层采用SBS改性沥青防水卷材和M15水泥砂浆,耐根穿刺层采用聚氯乙烯防水卷材,蓄排水层采用高密度聚乙烯排蓄水板,过滤层采用200~250g/m²的土工布,基质层采用商用绿化种植土,覆土厚度为0.8m,植被以佛甲草为主。

(2) 下凹式绿地。共设置下凹式绿地面积5.59hm²,主要位于绿化工程区,可以承接道路、屋顶汇水。下凹式绿地与广场、路面等相连接时,低于路面100mm;绿地内设置雨水口时,雨水口顶面标高高于绿地50mm,有效储水深度为50mm。

(3) 透水铺装。共设计透水砖铺装面积2.82hm²,主要布设在道路管线工程区和内部广场。结构方面自上而下采用20cm×10cm×6cm透水砖铺装,100mm厚无砂混凝土垫层,150mm厚单级配碎石垫层和地基素土夯实,该设计利于地表雨水下渗。

(4) 雨水调蓄池。共设置雨水调蓄池有效容积1000m³,主要位于建筑物工程区,其中A区共2座,调蓄总量为100m³,每座蓄水量为50m³;B区共2座雨水调蓄池,调蓄总量为220m³,每座蓄水量110m³,C区3座雨水调蓄池,调蓄总量为320m³,其中2座为110m³,1座为100m³;D区共2座雨水调蓄池,调蓄总量为200m³,每座调蓄池大小为100m³;E区共设置2座调蓄池,每座调蓄量为80m³。

调蓄池末端分别与市政道路雨水管线相连,可以承接道路、屋顶、绿地的汇水。雨水调蓄池采用钢筋混凝土结构,采用水泵提升雨水。以上工程的设计雨水重现期均为3a一遇。

1.2.2 雨水调蓄设施达标情况 按照《北京市房地产建设项目水土保持方案技术导则》(2009.7)和《雨水控制与利用工程设计规范》(DB11/685-2013),新

建小区年径流总量控制率不低于90%;新建工程硬化面积达2 000 m²以上的项目,应配建雨水调蓄设施,具体配建标准为:每1 000 m²硬化面积配建容积不小于30 m³的雨水调蓄池。对于居住类项目,硬化面积指屋顶硬化面积,按屋顶(不包括实现绿化的屋顶)的投影面积计;凡涉及绿地指标要求的建设项目,绿地中至少应有50%为下凹式绿地;人行道、自行车道和广场的透水铺装率不小于70%。

(1) 年径流控制率。设计降雨量为40.8 mm/场(对应的年径流总量控制率为90%),建成后年径流总量为3 789 m³,因此研究区雨水调蓄量应不小于3 789 m³。下凹式绿地共设置5.59 hm²,下凹深度为10 cm,有效蓄水深度为5 cm,可储水2 796 m³;设置雨水调蓄池1 000 m³,共可调蓄雨水量为3 796 m³,满足新建小区年径流总量控制率不低于90%的要求。

(2) 配建雨水调蓄池达标情况。建设类型为居住类建设项目,硬化面积为屋顶硬化投影面积2.24 hm²。根据每1 000 m²硬化面积配建调蓄容积不小于30 m³的雨水调蓄池,研究区需配建不小于972 m³的雨水调蓄池。雨水调蓄池为1 000 m³,满足相关标准。

(3) 透水铺装率达标情况。人行道、自行车停车场和广场共占地面积2.82 hm²,全部采用透水铺装,透水铺装率为100%,满足北京市规定的透水铺装率不小于70%的要求。

(4) 下凹式绿地率达标情况。研究区对集中绿地均采用下凹式绿地,下凹式绿地面积为5.59 hm²,绿地总面积为7.99 hm²,下凹式绿地率为70%,满足北京市规定的绿地中至少应有50%为下凹式绿地的要求。

(5) 屋顶绿化达标情况。北京市目前没有对屋顶绿化进行强制要求,本研究区屋顶共设置0.08 hm²屋顶绿化。

从以上分析可知,研究区设置的雨水调蓄设施均满足北京市相关标准的要求。

1.3 效益计算方法

通过对比研究区有无雨水调蓄设施对研究区减少雨水外排量、节约中水量、回补地下水量、消除污染物量、节电量、固碳释氧量的影响,并对其所产生的经济效益、生态效益进行计算与分析。其中,经济效益主要体现在节约城市排水设施运行费用、节约中水费用、节水效益、节电效益、回补地下水收益、消除污染而减少的社会损失、固碳释氧效益。生态效益主要体现在节水量、节电量、回补地下水量、固碳释氧量。

1.3.1 径流量计算 根据《雨水控制与利用工程设计规范》(DB11/685-2013),本研究的建筑小区的径流量计算参照公式(1)进行计算:

$$W=10 \times \varphi_{zc} \cdot h_y \cdot F \quad (1)$$

式中: W ——径流总量(m³); φ_{zc} ——雨量综合径流系数; h_y ——设计雨量(mm); F ——汇水面积(hm²)。

研究区内建筑物硬化屋顶面积为3.24 hm²,屋顶绿化面积为0.08 hm²,绿地面积为7.99 hm²,硬化道路面积为4.48 hm²,透水铺装面积为2.82 hm²。根据《雨水控制与利用工程设计规范》(DB11/685-2013),本研究建筑物硬化屋顶径流系数取0.9;屋顶绿化径流系数取0.15;绿地径流系数取0.15;硬化道路径流系数取0.9;透水铺装径流系数取0.4。下凹式绿地共设置5.59 hm²,下凹深度为10 cm,有效蓄水深度为5 cm,可储水2 796 m³;设置雨水调蓄池1 000 m³。

1.3.2 效益计算公式 本研究经济效益主要包括在节约城市排水设施运行费用、节约中水费用、节水效益、消除污染而减少的社会损失。具体计算方法如下,见公式(2)~(10)。

$$A_1=M_1 \cdot V_1 \quad (2)$$

式中: A_1 ——节约城市排水设施的费用(元); M_1 ——1 m³水的管网运行费用(元/m³)。通过各种雨水调蓄设施,入渗或蓄滞利用后,等量减少这些雨水通过向市政排水设施排放,减少了管网的运行费用,根据郭扬善等人的研究^[7],每方水排入雨水管网运行费用为0.08元。本研究 M_1 取0.08元/m³。 V_1 ——减少外排量(m³)。本研究减少的外排量为采用屋顶绿化后相对于硬质屋面减少的径流量、透水铺装相对于硬质铺装减少的径流量、下凹式绿地相比非下凹绿地增加的蓄渗量及雨水调蓄池的调蓄量之和。

$$A_2=M_2 \cdot V_2 \quad (3)$$

式中: A_2 ——节约中水的费用(元); M_2 ——雨水的回用量(m³)。雨水的回用量为雨水调蓄池调蓄水量。 V_2 ——中水价格(元/m³)。中水的水价采用2014年调整后的水价,根据《关于调整北京市再生水价格的通知》京发改[2014]885号,每1 m³中水价格不超过3.5元。本研究中水价格取3.5元/m³。

$$A_3=M_3 \cdot V_3 \quad (4)$$

式中: A_3 ——节约用水产生的效益(元); M_3 ——每缺1 m³水造成的经济损失(元/m³)。由于经济系统各部门之间的复杂联系,精确统计出经济损失比较困难,韩宇平等研究^[8],利用水资源投入产出宏观经济模型,对水资源的影子价格进行分析计算,可得到水

资源短缺的经济损失,北京市每缺水 1 m^3 造成的经济损失为 14.70 元。本研究 M_3 取 $14.8 \text{ 元}/\text{m}^3$ 。 V_3 ——节水量(m^3)。本研究 V_3 取值与减少雨水外排量 V_1 相等。

$$E = \frac{2.778 \times C \cdot F \cdot H \cdot \Delta T}{T_1} \cdot e \cdot T_2 + \frac{n \cdot K}{T_3} \quad (5)$$

式中: E ——年节电效益(元); C ——水的比热容,本次取 $4.2 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; F ——屋顶绿化面积(hm^2); H ——草坪年耗水量(mm)。根据程维新等^[9]的研究,北京地区草坪全年的耗水量 772 mm 。 ΔT ——降低室内温度的幅度($^\circ\text{C}$)。根据梁伟杰等^[10]的研究,夏季屋顶绿化可最大降低屋顶表面温度 $18 \sim 20 \text{ }^\circ\text{C}$,最大可降低室内温度 $5 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右。本研究 ΔT 取 $5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。 e ——电价[元/($\text{kW} \cdot \text{h}$)]。根据《关于降低本市燃煤发电上网电价等有关问题的通知》京发改[2016]6号,按照 $0.49 \text{ 元}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 计算。 T_1 ——绿地进行光合作用的有效日数(d);本研究 T_1 取 130 d 。 T_2 ——夏季需开空调天数(d)。北京地区夏季长达 105 d ,本研究 T_2 取 100 d 。 n ——空调个数(个); K ——每个空调成本(元/个)。本研究 K 取 $3000 \text{ 元}/\text{个}$ 。 T_3 ——空调可使用年限(a)。每台空调使用期 10 a ,本研究 T_3 取 10 a 。

$$A_4 = \beta M_4 \cdot V_4 \quad (6)$$

式中: A_4 ——回补地下水的收益(元); β ——降雨入渗回补地下水系数,根据有关研究^[11],北京市地下水回补系数为 $0.1 \sim 0.3$,本研究取 0.2 ; M_4 ——雨水下渗量(m^3)。本研究雨水下渗量为下凹式绿地蓄水量减去蒸发量的差值、透水铺装的下渗量之和。北京市汛期为 6—9 月,汛期雨水占到全年总降雨量的 80% 左右,因此根据刘熙明等^[12]的研究,北京市 7 月,8 月份日平均蒸发量为 $6 \text{ mm}/\text{d}$ 。本次蒸发量取 $6 \text{ mm}/\text{d}$ 。 V_4 ——地下水水资源费(元/ m^3)。按照《关于北京市居民用水实行阶梯水价的通知》京发改[2014]865号,地下水资源费为 $1.57 \text{ 元}/\text{m}^3$ 。本研究 V_3 取 $1.57 \text{ 元}/\text{m}^3$ 。

$$A_5 = \alpha M_5 \cdot V_5 \quad (7)$$

式中: A_5 ——消除污染而减少的社会损失(元); α ——投入产出系数。据分析^[7-8],消除污染每投入 1 元可减少环境资源损失是 3 元,因此投入产出比为 $1:3$ 。本研究取 3 。 M_5 ——排污费(元/ m^3)。按照《关于北京市居民用水实行阶梯水价的通知》京发改[2014]865号,居民污水处理费 $1.36 \text{ 元}/\text{m}^3$ 。 V_5 ——排污量(m^3)。城市小区的雨水汇流介质主要有屋面、绿地、道路。据孟立刚等^[13-14]研究,降雨初期 10 min 内屋面雨水的 COD,SS,TN,TP 均超标,未达

到地表水 IV 类标准,因此屋面雨水利用时应弃流 2 mm 左右;降雨 $10 \sim 20 \text{ min}$ 的屋面雨水水质好转,经简单处理后可直接利用;降雨 20 min 以后的降雨可直接回收利用。根据 HILLIGES 等^[15-17]的研究,城市道路主要污染物为 TSS 和 COD,其次为 TN,TP、重金属等,初期 30 min 或 $3 \sim 5 \text{ mm}$ 径流为初期径流,初期径流为道路雨水污染最严重的部分,后期雨水逐渐好转。本研究通过屋顶绿化、透水铺装、下凹式绿地将雨水蓄滞,减少污染物的排放。因此根据屋顶绿化、透水铺装、下凹式绿地的蓄滞量计算排污量。

$$C_{\text{碳}} = Q_{\text{碳}} \cdot T \cdot A \quad (8)$$

式中: $C_{\text{碳}}$ ——年吸碳量经济效益(元); $Q_{\text{碳}}$ ——年吸碳量(t/hm^2); T ——碳税率,采用瑞典碳税 $0.15 \text{ 美元}/\text{kg}$,按照当前人民币汇率—— 6.90 元 ,则碳税率为 $1.04 \text{ 元}/\text{kg}$; A ——屋顶绿化面积(hm^2)。

$$C_{\text{氧}} = Q_{\text{氧}} \cdot I \cdot A \quad (9)$$

式中: $C_{\text{氧}}$ ——年释氧量经济效益(元); $Q_{\text{氧}}$ ——年释放氧气量(t/hm^2); I ——工业制氧的价格($700 \text{ 元}/\text{t}$); A ——屋顶绿化面积(hm^2)。据喻阳华等^[18],熊向艳等^[19]研究, 1 hm^2 绿地每年可吸收二氧化碳 $2.9 \sim 4.1 \text{ t}$,释放氧气 $2.2 \sim 3.2 \text{ t}$ 。本研究取绿地吸收二氧化碳量和释氧量范围的中值作为计算定额,即 1 hm^2 绿地每年的二氧化碳吸收量取 3.5 t ,释氧量取 2.7 t 。

$$1 \text{ kJ} = 2.778 \times 10^{-4} \text{ kW} \cdot \text{h} \quad (10)$$

1.3.3 北京市年平均降雨情况 根据《北京市水务统计年鉴》,北京市年平均降雨量为 585 mm ,年平均降雨场数为 41 场,大于 10 mm 以上的降雨为 16 场。

2 效益分析

2.1 效益计算结果

(1) 节约城市排水设施运行费用计算。根据公式(1)可得,下凹式绿地年调蓄量为 26768 m^3 ,集雨池年调蓄量为 4569 m^3 ;屋顶绿化面积为 0.08 hm^2 ,相比硬化屋顶,年截留量为 258 m^3 ;采用透水铺装 2.82 hm^2 ,相比不透水铺装,年增渗量为 6057 m^3 。因此采用屋顶绿化、透水铺装、下凹式绿地、调蓄池后,雨水总调蓄量为 37651 m^3 ,减少外排量 37651 m^3 。按照公式(2)可得,年节约城市排水设施运行费用 A_1 为 3012 元 。

(2) 节约中水的费用。由于在绿地浇灌、车库冲洗、冲厕等用水中,可用雨水沉淀后直接使用,雨水设施的利用可减少中水的用量,减少量为集雨池年调蓄量,共减少中水水用量 3872 m^3 。因此根据公式(3)

可得,年节约中水的费用 A_2 为 15 990 元。

(3) 节水效益。研究区减少雨水资源浪费为采用屋顶绿化、透水铺装、下凹式绿地、调蓄池后,根据前文计算,减少的外排量为 $37\ 651\ \text{m}^3$,根据研究,北京市每缺水 $1\ \text{m}^3$ 造成的经济损失为 14.70 元,根据公式(4),节约用水产生的效益为 553 476 元。

(4) 节电效益。研究区绿地包括屋顶绿化 $0.08\ \text{hm}^2$,年蒸腾耗水量 $600\ \text{m}^3$ 。则年蒸腾吸热量为 $1.30 \times 10^7\ \text{kJ}$,绿地进行光合作用的有效日数为 130 d,则日蒸腾吸热量为 $9.98 \times 10^4\ \text{kJ}$,日蒸腾吸热 $9.98 \times 10^4\ \text{kJ}$,用空调降温来换算社区绿地的吸热降温效益,根据热当量换算公式(10),则日蒸腾吸热为 $27\ \text{kW} \cdot \text{h}$,按每天空调连续工作 8 h 计算,则为 $3.3\ \text{kW}$,若每台空调的功率为 $3.3\ \text{kW}$,则相当于 1 台空调,也就是说建成区绿地日平均蒸腾吸热 $9.98 \times 10^4\ \text{kJ}$ 相当于 1 台功率为 $3.3\ \text{kW}$ 的空调连续工作 8 h 降温所作的功。根据《关于降低本市燃煤发电上网电价等有关问题的通知》京发改[2016]6 号,按照 $0.49\ \text{元}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 计算,则研究社区绿地降温增湿的日经济效益为 13.23 元;北京地区夏季长达 105 d,如果按 100 d 计算,即空调工作 100 d,那么城市园林绿地降温的年效益为 1 323 元。若加上空调的成本,按每台空调使用期 10 a,每台 3 000 元计算,均摊到年空调成本为 300 元。根据公式(5),则研究社区绿地降温的年经济价值为 1 623 元。

(5) 回补地下水的收益。本研究雨水下渗水量为下凹式绿地蓄水量减去蒸发量的差值与透水铺装的下渗量之和。下凹式绿地年调蓄量为 $26\ 728\ \text{m}^3$,下凹式绿地储水过程中的蒸发量为 $6\ 712\ \text{m}^3$,因此其差值为 $20\ 056\ \text{m}^3$ 。透水铺装的下渗量为 $6\ 057\ \text{m}^3$ 。地下水的回补系数为 0.2,因此回补地下水的量为 $5\ 223\ \text{m}^3$ 。根据公式(6),地下水的回补收益为 8 190 元。

(6) 消除污染而减少的社会损失。本研究通过屋顶绿化、透水铺装、下凹式绿地将雨水蓄滞,减少污染物的排放,屋顶绿化、透水铺装、下凹式绿地的蓄滞量总和为 $33\ 083\ \text{m}^3$,根据公式(7),则消除污染而减少的社会损失 A_5 为 134 978 元。

(7) 固碳释氧。本研究区屋顶绿化面积 $0.08\ \text{hm}^2$,根据公式(8)可得,年吸收碳的生态效益为 290 元。

根据公式(9)可得,绿地年释放氧气的生态效益为 151 元。

2.2 效益综合评价

从以上分析可知,雨水利用措施具有明显的经济

效益和生态效益,按照面积均摊的计量,研究区总占地面积 $18.61\ \text{hm}^2$,该方案雨水利用措施每年产生的经济生态效益为 717 719 元,年节约中水量为 $3\ 872\ \text{m}^3$,年节电量为 $2\ 700\ \text{kW} \cdot \text{h}$,年回补地下水量为 $5\ 223\ \text{m}^3$,年固碳量为 0.28 t,年固氧量为 0.22 t。则每年单位面积产生的经济生态效益为 $38\ 566\ \text{元}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,年单位面积节约中水量为 $208\ \text{m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,年单位面积节电量为 $145\ (\text{kW} \cdot \text{h})/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,年单位面积回补地下水量为 $281\ \text{m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,年固碳增加量为 $0.02\ \text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,年释氧增加量为 $0.01\ \text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。具体效益量如表 1 所示。

表 1 研究区雨水利用措施的效益定量计算

效益类型	项目	效益总计	年单位面积的效益
经济效益	节省城市排水设施运行费用/元	3 021	162
	节省中水的费用/元	15 990	859
	节水效益/元	553 476	553 476
	节电效益/元	1 623	87
	回补地下水的收益/元	8 190	440
	消除污染而减少的社会损失收益/元	134 978	7 253
	固碳收益/元	290	16
	释氧收益/元	151	8
	合计	717 719	38 566
	生态效益	节约中水量/ m^3	3 872
节约用电量/ $(\text{kW} \cdot \text{h})$		2 700	145
回补地下水量/ m^3		5 223	281
固碳量/t		0.28	0.02
	释氧量/t	0.22	0.01

注:年单位面积的效益是指采用雨水利用设施后, $1\ \text{hm}^2$ 的面积上每年产生的经济效益和生态效益。

3 讨论与结论

本文从一个建设小区案例分析入手,分析了本研究区采用雨水调蓄设施后的经济效益和生态效益,从上述分析可知,每年单位面积产生的经济效益为 $38\ 566\ \text{元}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。采用雨水调蓄设施后,节水、节能等都具有明显的经济效益和生态效益。根据北京市国土资源局发布的《关于 2016 年度国有建设用地供应计划的通知》,2016 年全市国有建设用地计划供应总量 $4\ 100\ \text{hm}^2$,其中住宅用地 $1\ 200\ \text{hm}^2$,占总供应土地的 $1/3$,如上述住宅建设区均将海绵城市技术引入建设过程,每年产生的经济效益可达 4 628 万元。该效益不仅巨大,而且是可持续的,这对中国城市化进程推进具有重要的意义。

此外,研究发现屋顶绿化对城市的节能减排,固碳释氧都具有一定影响,但是由于中国多数城市对屋顶绿化没有强制性的规定,本文选取的研究案例屋顶绿化的面积较小(0.08 hm²),其有关生态及经济效益未充分发挥。

在海绵城市技术体系完善方面,虽然目前关于雨水调蓄利用技术研发与应用已愈发深入和普及,但仍未系统的建立公认的雨水调蓄利用的评价方法与指标体系,本文以透水铺装率、下凹式绿地率、雨水容积、屋顶绿化等几个重要指标入手,对其经济、社会效益进行探讨,在效益计算方法、关键参数区域异质性等方面未作深入研究,有待在今后工作中予以加强,进一步完善海绵社区,乃至海绵城市技术体系。

[参 考 文 献]

- [1] 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[J].生态学报,2016,36(16):4955-4957.
- [2] 张冬冬,严登华,王义成,等.城市内涝灾害风险评估及综合应对研究进展[J].灾害学,2014,29(1):144-149.
- [3] 叶丽梅,周月华,向华,等.基于GIS淹没模型的城市道路内涝灾害风险区划研究[J].长江流域资源与环境,2016,25(6):1002-1008.
- [4] 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):79-97.
- [5] 邓卓智,赵生成,宗复芑,等.基于水体自然净化的北京奥林匹克公园中心区雨水利用技术[J].给水排水,2008(9):96-100.
- [6] 李美娟,徐向舟,许士国,等.城市雨水利用效益综合评价[J].水土保持通报,2011,31(1):222-226.
- [7] 邬扬善,屈燕.北京市中水设施的成本效益分析[J].给水排水,1996(4):31-33,3.
- [8] 韩宇平,阮本清.水资源短缺风险经济损失评估研究[J].水利学报,2007,38(10):1253-1257.
- [9] 程维新,康跃虎.北京地区草坪耗水量测定方法及需水量浅析[J].节水灌溉,2002(5):12-14,46.
- [10] 梁伟杰,向艳,陈永焯,等.屋顶绿化夏季对室内的降温效果试验对比研究[J].建筑技术开发,2016,43(4):12-14.
- [11] 张志才.降雨入渗补给地下水研究[D].南京:河海大学,2006.
- [12] 刘熙明,胡非,李磊,等.北京地区夏季城市气候趋势和环境效应的分析研究[J].地球物理学报,2006,49(3):689-697.
- [13] 孟立刚,张建民,薛腾.典型屋面路面雨水污染状况调查与回收利用试验[J].净水技术,2015,34(1):29-32.
- [14] Zhang Qianqian, Wang Xiaoke, Hou Peiqiang, et al. The temporal changes in road stormwater runoff quality and the implications to first flush control in Chongqing, China[J]. Environmental monitoring and assessment, 2013,185(12):9763-9775.
- [15] Hilliges R, Schriewer A, Helmreich B. A three-stage treatment system for highly polluted urban road runoff [J]. Journal of Environmental Management, 2013, 128:306-312.
- [16] Bratieres K, Fletcher T D, Deletic A, et al. Nutrient and sediment removal by stormwater biofilters: A large-scale design optimisation study[J]. Water Research, 2008,42(14):3930-3940.
- [17] 张琼华,王倩,王晓昌,等.典型城市道路雨水径流污染解析和利用标准探讨[J].环境工程学报,2016,10(7):3451-3456.
- [18] 喻阳华,杨苏茂.森林固碳释氧研究进展[J].环保科技,2016,22(3):51-54.
- [19] 熊向艳,韩永伟,高馨婷,等.北京市城乡结合部17种常用绿化植物固碳释氧功能研究[J].环境工程技术学报,2014,4(3):248-255.
- [16] 冯磊.基于二分式CVM的三江平原湿地景观价值评价[D].哈尔滨:东北农业大学,2012:9-21.
- [17] IPCC. 2006 IPCC guidelines for national green house gas inventories: Volume II [R]. Japan:the Institute for Global Environmental Strategies,2008[2008-07-20].
- [18] 罗正月.劳动收入的最优化:农民工工资增长的新思路[J].西北农林科技大学学报:社会科学版,2013(1):6-11.
- [19] 官爱兰,蔡燕琦.农村人力资本开发对农业经济发展的影响:基于中部省份的实证分析[J].中国农业资源与区划,2015(1):31-37.
- [20] 杨培涛.牧民生计资本与生计策略的关系研究:以甘南藏族自治州为例[D].兰州:西北师范大学,2009:18-27.
- [21] 苏芳,蒲欣冬,徐中民,等.生计资本与生计策略关系研究:以张掖市甘州区为例[J].中国人口·资源与环境,2009,19(6):119-125.
- [22] 韦惠兰,冯茹,范文安.生态补偿与林缘社区的可持续生计:以甘肃白水江国家级自然保护区为例[J].农村经济,2008(4):62-65.
- [23] 唐莹,穆怀中.我国耕地资源价值核算研究综述[J].中国农业资源与区划,2014(5):73-79.

(上接第 118 页)