

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.06.006

大兴国际机场海绵城市建设模式碳减排效果分析

董莉榕¹, 刘家宏^{2,3}, 梅超², 周晋军¹, 张永祥¹

(1. 北京工业大学城市建设学部, 北京 100124; 2. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038; 3. 水利部数字孪生流域重点实验室, 北京 100038)

摘要:为分析北京大兴国际机场海绵城市建设模式碳减排效果,对海绵设施在特枯水年、偏枯水年、平水年、偏丰水年、特丰水年的降雨条件下的碳源和碳汇进行了核算,分析了碳减排途径与效果。结果表明:相比传统建设模式,大兴国际机场海绵城市建设模式全年的碳减排量为795.6~1804.0 t二氧化碳排放当量,平均每年减少1221.2 t;不同水文特征年,大兴国际机场的碳排放量削减率为47.5%~58.7%,海绵城市建设模式的二氧化碳排放当量相对传统建设模式年均减少54.9%;在一定范围内碳排放当量随着降水量的增加而增加,降水量越多,机场海绵城市建设模式碳减排绝对减少量越大。

关键词:海绵城市建设模式;碳排放量;碳减排效益;水文特征年;大兴国际机场

中图分类号:TU992;X322 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)06-0039-07

Analysis of carbon emission reduction effect of sponge city construction model at Daxing International Airport//
DONG Lirong¹, LIU Jiahong^{2,3}, MEI Chao², ZHOU Jinjun¹, ZHANG Yongxiang¹ (1. Faculty of Architecture, Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, IWHR, Beijing 100038, China; 3. Key Laboratory of Digital Twin Watershed, Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China)

Abstract: To analyze the carbon emission reduction effect of the sponge city construction model at Beijing Daxing International Airport, the carbon sources and sinks of sponge facilities under rainfall conditions in extra dry year, partial dry year, normal year, partial wet year, and extra wet year were calculated, and the pathways and effects of carbon emission reduction were analyzed. The results show that compared with the traditional construction mode, the carbon emission reduction of the sponge city construction model at Beijing Daxing International Airport for the whole year is 795.6 ~ 1804.0 t of carbon dioxide emission equivalent, with an average annual reduction of 1221.2 t. In different hydrological characteristics years, the carbon emission reduction rate of Daxing International Airport is 47.5% ~ 58.7%, and the carbon dioxide emission equivalents of the sponge city construction model are reduced relative to airports of the traditional construction mode by an average of an annual reduction of 54.9%. The carbon dioxide emission equivalent increases with the increase of rainfall in a certain range, and the more precipitation, the greater the absolute reduction of carbon emission reduction of the sponge city construction model.

Key words: sponge city construction mode; carbon emissions; carbon emission reduction benefits; hydrological characteristic year; Daxing International Airport

为提高国家自主贡献力度,我国提出力争于2030年前实现碳达峰,争取在2060年前实现碳中和^[1]。国务院《2030年前碳达峰行动方案》要求将碳达峰理念贯穿于经济社会发展全过程和各方面,重点强调实施包括城乡建设绿色发展碳达峰行动在

内的“碳达峰十大行动”。作为重要的城市基础设施,水系统的绿色发展是城乡建设过程中绿色发展的重要内容。海绵城市是新一代雨洪管理理念,是城市水系统绿色发展的重要理念^[2],具体指将城市建成一个能吸存水、过滤污染物的“海绵”,在适应

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3090600);国家自然科学基金项目(52192671)

作者简介:董莉榕(1997—),女,硕士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail:785907780@qq.com

通信作者:刘家宏(1977—),男,正高级工程师,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:liujh@iwhr.com

环境变化和应对自然灾害上具有良好的弹性,为城市提供减缓热岛效应、防止洪涝灾害、捕碳碳汇等效益^[3-4]。其实现形式是在传统灰色措施的基础上,建设绿色屋顶、下凹式绿地、雨水花园等海绵设施^[5-6],灰绿设施协同作用管理城市水系统。海绵城市的建设实施对于削减碳排放,助力实现碳中和具有重要的意义。

国内外学者对海绵城市建设及其绿色发展理念实施过程中的碳削减开展了大量研究。部分学者对单一海绵设施的碳减排效益进行了详细的分析,例如:曹丹^[7]基于全生命周期法评估了绿色屋顶的碳减排潜力,辩证了其在运行过程中各阶段的隐含能量;马洁^[8]通过对海绵城市建设典型设施的各项碳排放源进行对比分析,得到雨水花园、透水铺装、蓄水池、绿化屋顶在施工阶段的碳排放。也有学者以城市、校园为尺度对水系统碳排放进行研究,例如:Valek 等^[9]对墨西哥水系统的能量消耗进行了研究,结果表明供水系统是最大的能源消耗部门,对碳排放的影响最大;Shao 等^[10]以厦门为例通过定额计算算法分析了城市蓝绿空间对碳减排的影响,结果表明在城市中增加海绵设施碳汇作用显著;郑涛^[11]以上海某社区为例,基于生命周期评价法,构建了适用于居住社区海绵改造过程的碳排放核算体系;Su 等^[12]提出了城市排水系统碳排放框架,并使用排放因子法计算城市排水系统碳排放,结果表明传统城市排水系统和海绵城市排水系统的碳排放量分别约占城市碳排放量的 3.4% 和 1.7%,海绵城市的建设可大幅度降低城市碳排放量;Su 等^[13]以校园为研究区,采用层次分析法对各低影响开发设施组合情景的碳减排能力和经济效益进行了评价。海绵城市作为中国低碳生态城市发展的新模式,具有巨大的碳减排潜力,但目前关于海绵设施整体运行过程的碳排放研究较少,Liu 等^[14]基于绿色基础设施较系统地评估了城市排水系统对温室气体排放的减缓作用,但其仅将雨水泵、污水泵与污水处理厂作为碳排放的来源,未考虑绿色基础设施的碳汇作用。此外,海绵城市研究对机场的关注度不够,机场作为各大城市的主要交通枢纽,是碳排放的重要的贡献者。因此,研究机场的碳排放情况并找出改善方法,有助于加快我国碳达峰行动的进程。

本文综合分析大兴国际机场海绵设施在运行过程中对节能减排的促进作用,通过对比海绵城市建设模式和传统建设模式外排水泵能耗和市政供水配水过程中的能耗所产生的碳排放以及机场海绵设施的绿化固碳效果,分析机场海绵城市建设模式对节能减排的贡献。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

大兴国际机场位于中国北京市大兴区榆垓镇、礼贤镇和河北省廊坊市广阳区之间,建设区面积为 27.5 km²,如图 1 所示,场地布设包括道路、河渠、林地、耕地、砂荒地等多种土地利用类型。大兴国际机场地处永定河泛洪区,地势低洼,面临较高防洪压力;机场汇流面积大,且外排峰值流量受限,机场建成后大量硬化路面将产生严重面源污染。

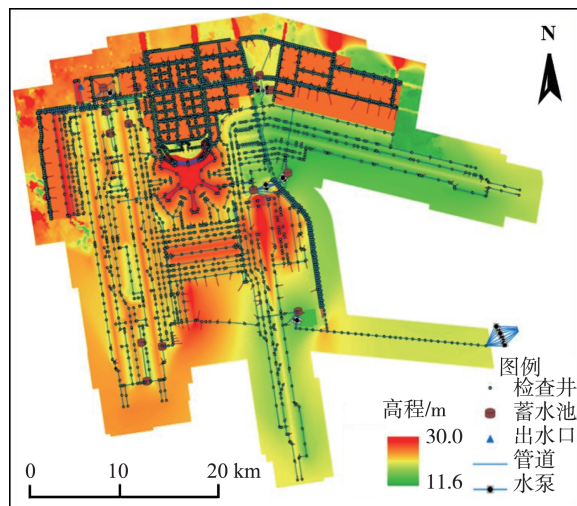


图 1 大兴国际机场概况

Fig. 1 Overview of Daxing International Airport

1.2 数据来源

降雨数据选用中国地面气候资料日值数据集 (V3.0) 中 54511 气象台数据。北京大兴国际机场一维管网模型所需的资料主要来源于机场工作区、飞行区、航站区施工图的模型数据,包括雨水管线、蓄水池、水泵等数据。根据北京大兴机场设计说明书,大兴机场污水处理厂出水尾间收纳水体为场内排水明渠,排水明渠下游进入改线后的新天堂河,新天堂河属于永定河水系,属地表 V 类水体,根据 DB11/890—2012《城镇污水处理厂污染物排放标准》,排入北京市 V 类水体的城镇污染出水执行该标准的 B 标准。污水经深度处理净化后,回用雨水水质应符合 GB18920—2002《城市污水再生利用城市杂用水水质》及 GB18921—2002《城市污水再生利用景观环境用水水质》中规定的标准。依据《气候变化 2007:联合国政府间气候变化专门委员会第四次评估报告》(IPCC4) 规定的全球变暖潜势值将其温室效应换算为统一的计量单位;依照《省级温室气体清单编制指南》(发改办气候〔2011〕1041 号)中规定的电能的热量值和统一单位的碳排放系数换算,电力碳排放系数参考华北地区的取值。

2 研究方法

针对海绵城市建设模式和传统建设模式两种建设模式下不同下垫面对雨水进行径流分析,计算雨水潜力。图2为两种建设模式下碳核算分析框架。在传统建设模式下,碳核算的主要内容是雨水回用代替自来水的市政供水的碳汇、机场内涝外排水泵碳排放及排水前污水处理的碳排放;海绵城市建设模式下,碳核算主要内容为雨水回用污水处理的碳排放、机场内部超标雨水外排的水泵碳排放及海绵绿色基础设施的碳汇。对比两种建设模式下的净碳排放量,进而分析机场在海绵城市建设模式下的碳减排潜力。

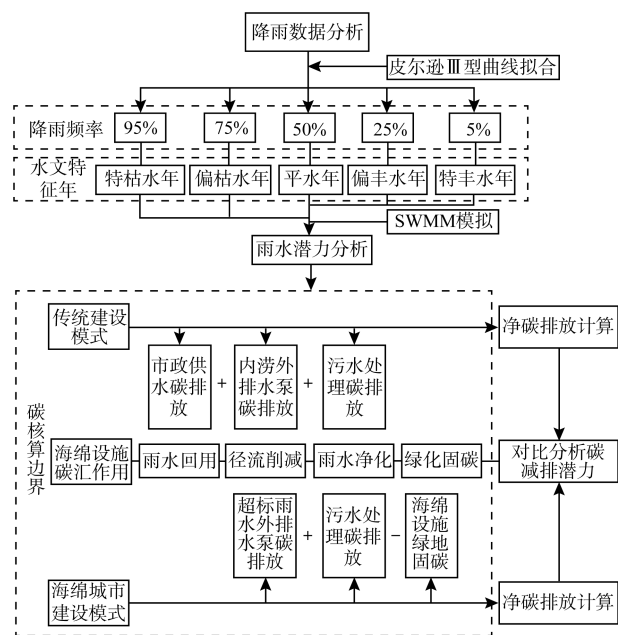


图2 两种建设模式下碳核算分析框架

Fig.2 Carbon accounting analysis framework under two construction modes

2.1 水文模拟

选取暴雨洪水管理模型(storm water management model, SWMM)对研究区进行水文模拟。采用皮尔逊Ⅲ型曲线拟合降雨数据^[15],在拟合曲线上反算出研究区水文特征年的降水量。结合构建的SWMM,在进行率定与验证基础上,分别输出特丰水年、偏丰水年、平水年、偏枯水年、特枯水年5种水文特征年情景下,大兴国际机场海绵城市建设模式与传统建设模式下的出水口流量过程。

2.2 污水泵碳排放核算

各地块雨水通过管道收集,初期弃流雨水通过污水泵输送到污水处理厂进行处理^[16],污水泵能耗碳排放计算公式为

$$M_{wp} = \frac{\rho g H_w Q_w E_{CO_2}}{3.6 \times 10^6 \eta_w} \quad (1)$$

式中: M_{wp} 为污水泵产生的能耗碳排放量; ρ 为雨水的密度; g 为重力加速度; H_w 为污水泵扬程; Q_w 为污水处理厂的进水量; η_w 为污水泵效率; E_{CO_2} 为电力碳排放系数,本文取 $0.8843 \text{ kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。

2.3 污水处理厂碳核算

大兴国际机场周边尚无适合的污水处理厂以接纳机场产生的污水,故在机场内部自建污水处理厂。污水处理厂主体采用 $A^2/O + \text{MBR}$ 工艺,该工艺碳排放分为直接碳排放和间接碳排放,其中直接碳排放包括 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 碳排放^[17],根据联合国在政府气候变化专门委员会发布的指南,污水处理厂过程中产生的 CO_2 属于生物碳,不纳入温室气体排放的计算,此处仅需计算污水处理过程中直接排放 CH_4 和 N_2O 产生的碳排放^[18],其计算公式分别为

$$M_C = V(\rho_{C0} - \rho_{Ce}) E_{FC} G_{WC} \times 10^{-3} \quad (2)$$

$$M_N = V(\rho_{N0} - \rho_{Ne}) E_{FN} G_{WP} \times 10^{-3} \quad (3)$$

式中: M_C 为污水处理厂 CH_4 碳排放量; V 为污水处理厂进水量; ρ_{C0} 、 ρ_{Ce} 分别为污水处理厂的进、出水中COD质量浓度,流入污水处理厂的水中COD的平均质量浓度为 450 mg/L ,经污水处理厂净化后满足外排要求的COD质量浓度为 30 mg/L ,雨水回用的COD质量浓度标准为 6 mg/L ; E_{FC} 为 CH_4 的排放因子,根据《2006年IPCC国家温室气体清单指南》推荐缺省值和中国污水处理厂实际情况,本文取 0.086 kg/kg ; G_{WC} 为 CH_4 的全球变暖潜能值,本文取 25.0 ; M_N 为污水处理厂的 N_2O 碳排放量; ρ_{N0} 、 ρ_{Ne} 分别为污水处理厂的进、出水的TN质量浓度,流入污水处理厂的水中TN的平均质量浓度为 50 mg/L ,经污水处理厂净化后满足外排要求的TN质量浓度为 15 mg/L ,雨水回用的TN质量浓度标准为 10 mg/L ; E_{FN} 为 N_2O 排放因子,根据《2006年IPCC国家温室气体清单指南》推荐缺省值和中国污水处理厂实际情况,本文取 0.035 kg/kg ; G_{WP} 为 N_2O 的全球变暖潜能值,本文取 298.0 。

间接排放主要指污水处理厂运行过程中消耗电力产生的碳排放^[19],其计算公式为

$$M_{in} = V E_H E_{FC} G_{WP} \quad (4)$$

式中: M_{in} 为污水处理厂污水处理设备运行年耗电力产生碳排放当量; E_H 为污水处理厂处理设备运行年耗电量。

2.4 泵站外排雨水耗能碳排放

机场内部雨水与污水采用分流制收集后由污水泵排进污水处理厂进行统一处理,达到国家排放标准后由雨水泵排入机场外部永定河^[14]。外排雨水耗能主要是泵站的耗能,其计算公式为

$$M_{\text{rp}} = \frac{\rho g H_{\text{R}} Q_{\text{R}} E_{\text{CO}_2}}{3.6 \times 10^6 \eta_{\text{R}}} \quad (5)$$

式中: M_{rp} 为雨水外排产生的能耗碳排放量; H_{R} 为水泵扬程; Q_{R} 为雨水排出量; η_{R} 为雨水泵效率, 本文采用卧式离心泵, 取 0.875。

2.5 机场外自来水厂配水运输水碳排放

大兴国际机场采用永定河北部的自来水厂供水, 海绵城市建设模式就地回用雨水可代替部分自来水供给, 减少自来水输送途中产生的碳排放。水源通过市政管道输送到机场的过程中需要克服阻力, 此过程中产生能耗, 基于水在输水管道的沿程损失, 结合水力学公式计算其能耗碳排放^[20], 计算公式为

$$M_{\text{sy}} = \frac{g h_{\text{f}} Q E_{\text{FC}}}{3.6 \times 10^3} \quad (6)$$

其中

$$h_{\text{f}} = \frac{6.35 n^2 v^2 L}{d^{4/3}}$$

式中: M_{sy} 为市政供水输送过程产生的碳排放量; h_{f} 为输水的沿程损失; Q 为自来水输送量; n 为管道粗糙系数, 管内做水泥衬砌, 本文取 0.012; v 为管道设计流速, 本文取 1.5 m/s; L 为输水长度, 输水管道全长 29 km; d 为管道内径, 本文采用管径 1 200 mm 球墨铸铁管。

2.6 海绵绿地碳汇作用

海绵绿色基础设施具有固碳作用^[21], 其计算公式为

$$M_{\text{a}} = S m_{\text{a}} \times 10^3 \quad (7)$$

式中: M_{a} 为绿地固碳量; S 为绿地面积; m_{a} 为绿地吸收二氧化碳定额, 1 hm^2 绿地每年可吸收二氧化碳 2.9 ~ 4.1 t, 本文取绿地吸收二氧化碳范围的中值作为计算定额。

2.7 两种建设模式碳排放对比

绝对碳排放减少量及相对碳排放减少值的计算公式分别为

$$M_{\text{ab}} = M_{\text{T}} - M_{\text{S}} \quad (8)$$

$$I = \frac{M_{\text{ab}}}{M_{\text{T}}} \times 100\% \quad (9)$$

式中: M_{ab} 为绝对碳排放减少量; M_{T} 为传统建设模式碳排放总量; M_{S} 为海绵城市建设模式碳排放总量; I 为相对碳排放减少值。

3 结果与分析

3.1 水文特征年确定

采用 1988—2020 年大兴国际机场年降雨数据组成统计样本, 依靠皮尔逊 III 型曲线进行趋势性拟合, 调整变差系数与偏态系数, 使拟合度达到 98.52%。通过皮尔逊 III 型曲线反算得到大兴国际机场不同降雨频率下的年降水量, 在实际年降雨数据中选取降水量接近的年份。因此, 选取降雨频率为 95%, 年降水量为 317.7 mm 为特枯水年, 对应年份为 2006 年; 降雨频率为 75%, 年降水量为 410.7 mm 为偏枯水年, 对应年份为 2005 年; 降雨频率为 50%, 年降水量为 483.9 mm 为平水年, 对应年份为 2007 年; 降雨频率为 25%, 年降水量为 576.3 mm 为偏丰水年, 对应年份为 2017 年; 降雨频率为 5%, 年降水量为 747.9 mm 为特丰水年, 对应年份为 1991 年。5 个水文特征年实测降水量年内分布如图 3 所示。根据选取的 5 个水文特征年的实测降雨数据, 取每场降雨前 3 mm 作为初期雨水弃流, 利用 SWMM 得到大兴国际机场逐月累积外排水量和初期雨水弃流量, 结果如图 4 所示。

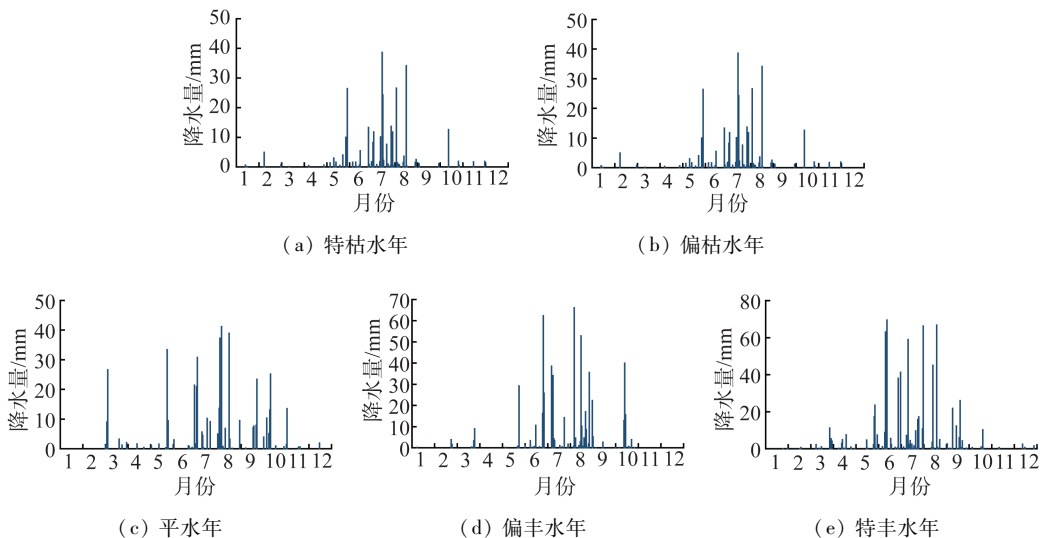


图3 水文特征年降水量分布

Fig.3 Precipitation distribution of hydrological characteristic years

—■— 海绵机场建设模式外排水量 —■— 传统机场建设模式外排水量 —■— 初期雨水弃流量

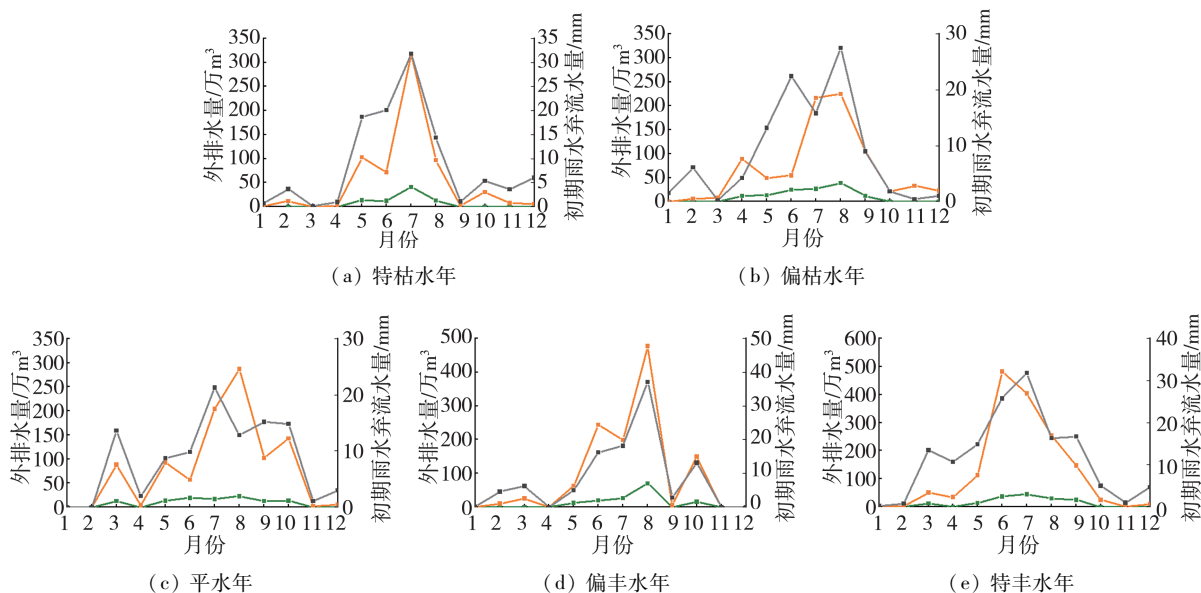


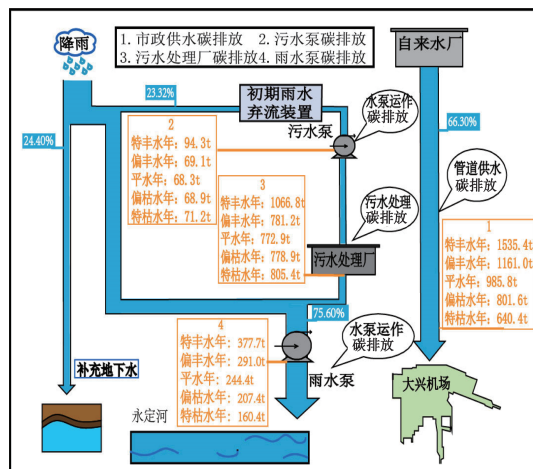
图4 大兴国际机场水文特征年 SWMM 输出结果

Fig.4 SWMM output results of hydrological characteristic years at Daxing International Airport

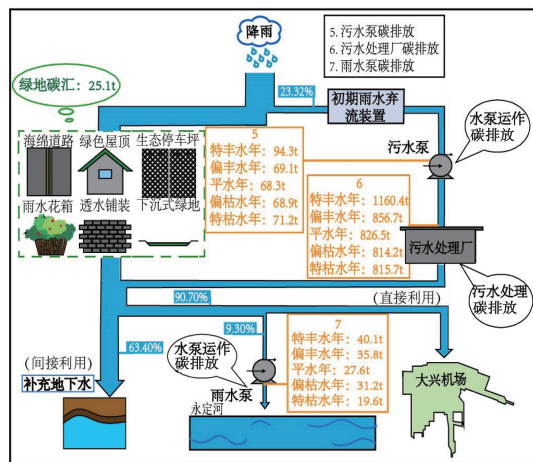
3.2 两种建设模式碳排放核算

图5为两种建设模式下的研究边界与碳排放核算结果。传统建设模式的大兴机场多为硬化路面,暴雨来临时,为防止机场内涝灾害主要依靠灰色基础设施以快排模式将雨水迅速排至机场外。海绵城市建设模式利用海绵道路、绿色屋顶、生态化停车坪、下沉式绿地、透水铺装和高架桥下的雨水花箱等绿色基础设施收集并对雨水进行初步净化,初期弃流雨水通过网管排至机场内的污水处理厂,一部分雨水通过下渗回灌地下水,对地下水进行补给,另一部分补给景观湖增加机场观赏效果或由供水管网作为中水供给回用于机场,超标的雨水通过溢流管进入雨水排除系统外排至天堂河。

计算大兴国际机场机场在特枯水年、偏枯水年、平水年、偏丰水年及特丰水年条件下,两种建设模式各单元的碳排放。传统建设模式下由于不透水面积较大,在机场地表产生大量径流,为避免机场发生洪涝危害需将径流外排,传统建设模式下雨水泵在5个水文特征年产生的碳排放分别为160.4、207.4、244.4、291.0、377.7 t;海绵城市建设模式下雨水经海绵设施的自净作用后回用于机场,只需将超标雨水外排即可,故在雨水泵模块产生碳排放量远小于传统建设模式,海绵建设模式下雨水泵在5个水文特征年产生的碳排放分别为19.6、31.2、27.6、35.8、40.1 t。由于两种建设模式下污水处理厂均只对污染浓度较高的初期雨水弃流进行净化,传统建设模式下水务处理厂在5个水文特征年产生的碳排放



(a) 传统建设模式



(b) 海绵城市建设模式

图5 两种建设模式下的研究边界及碳排放核算

Fig.5 Research boundary and carbon emission accounting under two construction models

分别为 876.6、847.8、841.2、850.3、1 161.1 t;海绵城市建设模式下需将雨水处理至可回用标准,故相对于传统建设模式来说,污水处理厂碳排放量相对较高,海绵城市建设模式下污水处理厂在 5 个水文特征年产生的碳排放分别为 886.9、883.1、894.8、925.8、1 254.7 t。另外,在传统建设模式下机场杂用水需采取机场外自来水厂供水的方式,输水过程中产生大量能耗排放,传统建设模式下在 5 个水文特征年需要市政供水产生的碳排放分别为 640.4、801.6、985.8、1 161.0、1 535.4 t;海绵建设模式下无此项碳排放。

3.3 海绵城市建设模式碳减排效益

机场是交通运输场所,日运作耗能大,运行阶段碳排放量较大,同时大兴国际机场降水量相对于较低,海绵城市建设改造率高,碳减排效益更为明显。相比传统建设模式,海绵城市建设模式在特枯水年、偏枯水年、平水年、偏丰水年及特丰水年的相对碳减排值分别为 47.5%、52.1%、56.7%、59.4%、58.7%,绝对碳减排量分别为 795.6、967.3、1 173.6、1 365.5、1 804.0 t。由定量分析结果可以看出,年降水量由 317.7 mm 增加至 747.9 mm 时,绝对碳减排量逐步增加,且增幅变大,即碳减排效益越明显;年降水量从 317.7 mm 增加至 576.3 mm 时相对碳减排值的增量呈增加趋势,年降水量由 576.3 mm 增加至 747.9 mm 时,降水量增幅更大,但相对碳减排值有所下降。可见,海绵城市建设模式中海绵设施在节能减排上产生的效益并不会随着降水量的增加持续增加。当降水量超过一定值时,碳减排效益增长趋势趋于平缓,主要原因是海绵设施雨水回用的能力有限。鉴于此,在海绵城市建设模式中适当配置绿色基础设施有利于增大机场雨水回用量,进而增加机场碳汇;另一方面,绿色基础设施的增加,绿地固碳量也会随之增加,从而提升海绵设施碳减排效益。

传统建设模式下不同重现期碳排放量统计中供水系统产生的碳排放量均占较大比例,雨水回收利用不仅可以大大提高水资源的利用效率,有效改善区域生态环境,另一方面雨水回用代替自来水可以减轻市政供水管网的压力,从而减轻这一过程中形成的碳排放。海绵城市建设模式将雨水就地利用,对回用雨水汇入机场内污水处理厂进行净化产生碳排放量远小于传统建设模式下该部分水由市政供给及外排雨水产生的碳排放,由此可见在机场建设过程中,适当增加海绵设施可有效提高机场的雨水回用的潜力,从而加大机场碳减排效益。

4 结 论

a. 北京大兴国际机场在海绵城市建设模式下的碳排放总量比较稳定,但在传统建设模式下的碳排放总量随着降水量的变化有较大的变化幅度。与传统建设模式相比,海绵城市建设模式的碳排放量在不同特征水文年中减少 47.5%~58.7%,二氧化碳碳排放当量绝对值减少了 795.6~1 804.0 t,平均每年减少 1 221.2 t。

b. 在年降水量较小时,机场海绵设施尚未发挥明显的碳减排作用。相对于传统建设模式下的机场,随着年降水量的增加,海绵城市建设模式下的机场绝对碳减排量仍呈增大趋势,但相对碳减排值有所降低。

c. 机场在海绵城市建设模式下通过分散式绿色基础设施从源头滞蓄径流雨水,通过中途转输设施将雨水进行转输和利用,从而缓解城市雨水带来的各种问题,大幅降低传统排水系统建设和运行带来的碳排放。海绵城市建设模式中大量的绿色屋顶、雨水花园、下沉绿地、植被浅沟、湿地以及其他绿色系统可以为城市提供重要的碳汇。雨水调蓄池调蓄罐等设施专门收集的雨水,可用于市政绿化浇洒、道路保洁、场地清洗、控尘降温以及厕所用水等,大幅减少了自来水的使用量,经济效益和生态效益显著。

参考文献:

- [1] WANG P, HUANG R, ZHANG S, et al. Pathways of carbon emissions reduction under the water-energy constraint: a case study of Beijing in China[J]. Energy Policy, 2023, 173:113343.
- [2] 高玉琴,陈佳慧,王冬冬,等. 海绵城市低影响开发措施综合效益评价体系及应用[J]. 水资源保护, 2021, 37(3): 13-19. (GAO Yuqin, CHEN Jiahui, WANG Dongdong, et al. Comprehensive benefit evaluation system and application of low impact development measures in sponge cities[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(3):13-19. (in Chinese))
- [3] 刘家宏,王开博,徐多,等. 高密度老城区海绵城市径流控制研究[J]. 水利水电技术, 2019, 50(11): 9-17. (LIU Jiahong, WANG Kaibo, XU Duo, et al. Study on runoff control for sponge city construction of high-density old urban district[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(11): 9-17. (in Chinese))
- [4] 段小龙,李家科,蒋春博. 雨水生物滞留系统关键设计参数研究进展[J]. 安全与环境工程, 2022, 29(2):

- 111-119. (DUAN Xiaolong, LI Jiak, JIANG Chunbo. Research progress on design of stormwater bioretention system[J]. Safety and Environmental Engineering, 2022, 29(2): 111-119. (in Chinese))
- [5] 杨银川,肖冰,崔贺,等.海绵城市的发展沿革及其对径流污染控制的研究现状[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2018(6): 32-42. (YANG Yinchuan, XIAO Bing, CUI He, et al. Development history of sponge cities and the state of research on runoff pollution control[J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2018(6): 32-42. (in Chinese))
- [6] 李俊奇,孙梦琪,李小静,等.生物滞留设施对雨水径流热污染控制效果试验[J]. 水资源保护, 2022, 38(4): 6-12. (LI Qijun, SUN Mengqi, LI Xiaojing, et al. Experimental study on thermal pollution control of stormwater runoff by bioretention [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(4): 6-12. (in Chinese))
- [7] 曹丹.绿色屋顶固碳减排潜力研究综述[J]. 建筑与文化, 2021(10): 27-30. (CAO Dan. Review of research on carbon sequestration potential of green roofs [J]. Architecture & Culture, 2021(10): 27-30. (in Chinese))
- [8] 马洁.海绵城市建设典型措施的碳源解析和碳排放研究[D]. 太原:山西农业大学, 2019.
- [9] VALEK A M, SUŠNIK J, GRAFAKOS S. Quantification of the urban water-energy nexus in México City, México, with an assessment of water-system related carbon emissions [J]. Science of The Total Environment, 2017, 590/591: 258-268.
- [10] SHAO W, LIU J, YANG Z, et al. Carbon reduction effects of sponge city construction: a case study of the city of Xiamen[J]. Energy Procedia, 2018, 152: 1145-1151.
- [11] 郑涛.居住社区海绵改造过程的碳排放核算研究[J]. 中国给水排水, 2021, 37(19): 112-119. (ZHENG Tao. Estimation of carbon emission during sponge city reconstruction of residential community [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(19): 112-119. (in Chinese))
- [12] SU X, SHAO W, LIU J, et al. How does sponge city construction affect carbon emission from integrated urban drainage system[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 363: 132595.
- [13] SU J, LI J, GAO X, et al. Comprehensive analysis of waterlogging control and carbon emission reduction for optimal LID layout: a case study in campus [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 58(29): 87802-87816.
- [14] LIU J, WANG J, DING X, et al. Assessing the mitigation of greenhouse gas emissions from a green infrastructure-based urban drainage system[J]. Applied Energy, 2020, 278: 115686.
- [15] 肖友淦.城市暴雨强度公式理论频率曲线选择研究[J]. 福建建筑, 2019(12): 119-125. (XIAO Yougan. Study on selection of theoretical frequency curve of urban storm intensity formula [J]. Fujian Architecture & Construction, 2019(12): 119-125. (in Chinese))
- [16] 朱永霞.社会水循环全过程能耗评价方法研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2017.
- [17] 呼永锋,梁梅,张永祥,等. $A^2/O + MBR$ 工艺运行效果与碳排放特征研究[J]. 中国环境科学, 2021(41): 4439-4446. (HU Yongfeng, LIANG Mei, ZHANG Yongxiang, et al. Study on operation efficiency and carbon emission characteristics of $A^2/O + MBR$ process [J]. China Environmental Science, 2021(41): 4439-4446. (in Chinese))
- [18] 雷然.北京大兴国际机场污水处理厂污水处理工艺剖析[J]. 中小企业管理与科技, 2019(27): 148-149. (LEI Ran. Analysis of the sewage treatment process of sewage treatment plant at Beijing Daxing international airport[J]. Management & Technology of SME, 2019(27): 148-149. (in Chinese))
- [19] 余娇.基于“水—能—碳”关联的郑州市水系统碳排放研究[D]. 郑州:华北水利水电大学, 2021.
- [20] LIU J, WANG D, XIANG C, et al. Assessment of the energy use for water supply in Beijing [J]. Energy Procedia, 2018, 152: 271-280.
- [21] 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. (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. (in Chinese))

(收稿日期:2023-03-03 编辑:王芳)

