

城市雨水管理

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2024. 21. 019

基于全生命周期的市政道路LID设施低碳布置研究

李欢^{1,2}, 杜成银³, 梁梅⁴, 王德淇^{1,2}, 刘学峰^{1,2}, 陈海⁵,
刘建林⁶, 李伟⁶, 曹连宝⁶, 张婷婷^{1,2}, 未碧贵^{1,2}

(1. 兰州交通大学 环境与市政工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省黄河水环境重点实验室, 甘肃 兰州 730070; 3. 广东首汇蓝天工程科技有限公司, 广东 广州 510030;
4. 天水市海绵城市建设服务中心, 甘肃 天水 741000; 5. 天水市住房和城乡建设局,
甘肃 天水 741000; 6. 北京市市政工程设计研究总院有限公司, 北京 100082)

摘要: 为了获得市政道路低影响开发(LID)设施的低碳布置方案,定义了基于径流总量控制量的碳排放强度,其含义为全生命周期碳排放量与全生命周期径流总量控制量的比值。并以甘肃省天水市中心大道为研究对象,建立InfoWorks ICM模型,研究影响碳排放强度的主要因素。结果表明,当年降雨量一定时,较小面积比例的透水铺装或较大面积比例的雨水花园对碳排放量的控制效果较好;当LID设施面积比例一定时,年降雨量越小,对碳排放量的控制效果越好;正交试验显示,三种因素对碳排放强度的影响次序为透水铺装面积比例>雨水花园面积比例>年降雨量,当年降雨量比现状减少10%、透水铺装和雨水花园的面积比例均为10%时碳排放强度最小。从碳减排的角度考虑,优先布置最大面积比例的雨水花园,在年径流总量控制率未达到要求时再适当增加透水铺装的面积,此优化布置方案具有较好的碳减排效益。

关键词: 市政道路; 低影响开发设施; 径流总量控制量; 碳排放强度; 全生命周期
中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)21-0121-08

Low-carbon Layout of Municipal Road LID Facilities Based on Whole Life Cycle

LI Huan^{1,2}, DU Cheng-yin³, LIANG Mei⁴, WANG De-qi^{1,2}, LIU Xue-feng^{1,2},
CHEN Hai⁵, LIU Jian-lin⁶, LI Wei⁶, CAO Lian-bao⁶, ZHANG Ting-ting^{1,2}, WEI Bi-gui^{1,2}

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Key Laboratory of Yellow River Water Environment in Gansu Province, Lanzhou 730070, China; 3. Guangdong Shouhui Blue Sky Engineering Technology Co. Ltd., Guangzhou 510030, China; 4. Sponge City Construction Service Center of Tianshui, Tianshui 741000, China; 5. Tianshui Housing and Urban-Rural Development Bureau, Tianshui 741000, China; 6. Beijing General Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Beijing

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52060014); 国家重点研发计划项目(2018YFE0206200); 甘肃省建设科技攻关项目(JK2023-18、JK2024-21); 广东首汇蓝天工程科技有限公司科研项目(KY-2022-04); 甘肃省科技计划项目(21JR7RA340)

通信作者: 未碧贵 E-mail: weibg@mail.lzjtu.cn

100082, China)

Abstract: To acquire the low-carbon layout plan of municipal road low impact development (LID) facilities, the carbon emission intensity based on the total runoff control volume was defined, representing the ratio of the total carbon emissions throughout the whole life cycle to the total runoff control volume throughout the whole life cycle. The InfoWorks ICM model was constructed to investigate the main factors influencing carbon emission intensity in the Center Road of Tianshui City. When the annual rainfall remained constant, a relatively small proportion of permeable pavement or a relatively large proportion of rain garden had a superior control effect on carbon emissions. When the proportion of LID facilities area remained constant, the lower annual rainfall resulted in a better control effect on carbon emissions. The orthogonal test indicated that the influence of the three factors on carbon emission intensity in descending order was as follows: the proportion of permeable pavement area, the proportion of rain garden area and the annual rainfall. When the annual rainfall decreased by 10% and the proportions of both the permeable pavement and the rain garden area were 10%, the carbon emission intensity was the lowest. From the perspective of carbon emission reduction, prioritizing the layout of rain garden with the maximum area ratio, and appropriately increasing the area of permeable pavement when the volume capture ratio of annual runoff failed to meet the requirements, this optimal layout scheme had more favorable benefits in carbon emission reduction.

Key words: municipal road; low impact development facility; annual total runoff control volume; carbon emission intensity; whole life cycle

城市化建设导致下垫面不透水面积增加,道路作为城市的主要下垫面之一,雨水径流量较大,随着海绵城市的建设,合理的设置道路低影响开发(LID)设施有利于实现年径流总量控制,改善城市水环境。海绵城市的建设可以直接或间接地降低城市能源消耗及材料生产过程中产生的碳排放。同时,海绵城市作为中国践行低碳建设理念的碳减排项目,可以直接或间接减少城市碳排放。陈菊香等人^[1-2]概述了海绵城市碳减排概念,提出了相关建设思路,探索了乌鲁木齐市海绵城市LID措施的减排效果和综合效益。贾玲玉^[3]在分析LID技术效果的基础上,引入了碳减排概念对LID的碳效益进行评估。笔者将全生命周期碳排放量与全生命周期径流总量控制量的比值定义为基于径流总量控制量的碳排放强度,以模型与计算相结合的方式,对甘肃省天水市中心大道构建InfoWorks ICM模型,设置不同面积比例的LID设施和年降雨量,设计3因素5水平正交试验,研究透水铺装面积比例、雨水花园面积比例和年降雨量对碳排放强度的影响,以期海绵城市道路LID设施的低碳布置提供参考。

1 研究道路概况

研究区域位于天水市的中心大道,该双幅道路红线从左到右依次为3 m宽的人行道及非机动车道、3 m宽的行道树绿带、12 m宽的机动车道和9 m宽的中央分车绿带,它们的面积分别为3 050.8、3 028.9、15 052.5、4 955.8 m²,总面积约为27 228.9 m²。人行道及非机动车道与机动车道的雨水径流入行道树绿带后排往雨水口,中央分车绿带的雨水径流直接排往雨水口,径流组织如图1所示。

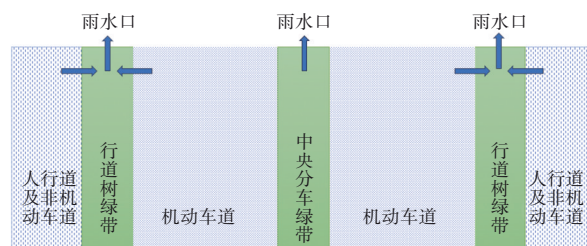


图1 径流组织示意

Fig.1 Schematics of runoff organization

2 研究方法

2.1 InfoWorks ICM模型构建

InfoWorks ICM模型是英国Wallingford公司研发的用于城市综合流域排水的模型软件,本研究主

要利用该软件进行降雨模拟,得出研究区域的全生命周期径流总量控制量。

2.1.1 模型构建

综合考虑研究区域的排水管网拓扑关系和地面高程等因素,建立排水管网模型,通过降雨产汇流模型和管网一维、二维汇流计算,得出不同降雨情景下的径流总量控制量。模型构建过程包括:

① 数据导入:将管立得软件处理后的管网数据导入模型软件,并进行数据检查与修正,确保数据的真实有效。共导入46个检查井、1个出水口、46段管道,管径为300~800 mm。以多边形的形式导入下垫面图形,并导入用GIS处理好的地面TIN模型。

② 集水区划分:采用手绘多边形法进行子集水区的划分,共划分8个子集水区。

③ 集水区设置:通过下垫面类型资料对径流表面和土地用途进行设置,实现对不同表面产、汇流的精细化模拟。

④ 降雨设计:采用天水市暴雨强度公式,见式(1)。通过设置降雨事件中对应暴雨强度公式的参数来进行降雨模拟。选择1、2、3、5、10年五种重现期,降雨历时为120 min,雨峰系数为0.398。

$$q = \frac{712.9(1 + 1.9 \lg P)}{(t + 8.711)^{0.742}} \quad (1)$$

式中: q 为暴雨强度, $L/(s \cdot \text{hm}^2)$; P 为降雨重现期,年; t 为降雨历时,min。

⑤ 2D区间:通过手绘多边形生成2D区间,进行网格化处理,并对道路多边形进行网格化区间处理,将其高程降低0.1 m。修改节点洪水类型为2D,完成模型的1D与2D耦合。

⑥ SUDS控制:在图1中的人行道及非机动车道布置透水铺装,在行道树绿带布置雨水花园。由于人行道及非机动车道和行道树绿带的总面积相近,因此本研究中透水铺装的面积大小用透水铺装的面积比例表示,其含义为透水铺装的面积与人行道及非机动车道的总面积之比,分别用符号P10、P30、P50、P70、P90代表透水铺装的面积比例为10%、30%、50%、70%、90%;雨水花园的面积大小用雨水花园的面积比例表示,其含义为雨水花园的面积与行道树绿带的总面积之比,分别用符号R10、R30、R50、R70、R90代表雨水花园的面积比例为10%、30%、50%、70%、90%。中央分车绿带和机动车道不布置LID设施^[4]。中心大道的InfoWorks ICM

模型如图2所示。

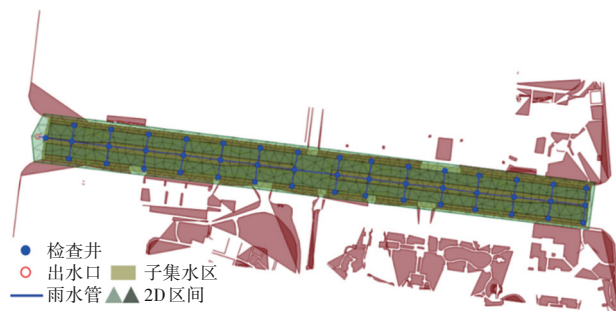


图2 中心大道的InfoWorks ICM模型

Fig.2 InfoWorks ICM model of Center Road

2.1.2 模型参数

根据相关文献^[5-7]及模型手册,初步确定模型初始参数。汇流模型选择SWMM,机动车道汇流参数取0.012,径流量类型为Fixed,固定径流系数为0.95;绿地汇流参数取0.25,径流量类型为Horton,固定径流系数为0.2;人行道及非机动车道汇流参数取0.012,径流量类型为Fixed,固定径流系数为0.6;LID设施的参数详见参考文献[8]。

2.1.3 模型参数确定

由于缺少实测的降雨径流资料,因此以输入模型的多场降雨数据为基础,应用综合径流系数法进行模型的率定。根据子流域径流系数,以子流域面积为权重,求得各子流域径流系数的加权平均值,即本研究区域的综合径流系数,并与研究区域内的理论综合径流系数进行比较。计算得出研究区域的综合径流系数为0.79,与《城镇雨水系统规划设计暴雨径流计算标准》(DB 11/T 969—2016)、《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)等标准中道路与交通设施用地的综合径流系数0.8~0.9较为接近,模型具有一定的可靠性。

2.2 碳排放强度

2.2.1 碳排放强度的计算

本研究将基于径流总量控制量的碳排放强度定义为全生命周期碳排放量与全生命周期径流总量控制量的比值,其含义为控制单位径流量所排放的碳量。全生命周期年限取30年,计算公式如下:

$$CI = \frac{E}{V} \quad (2)$$

式中:CI为碳排放强度(以CO₂计,下同),kg/m³;E为全生命周期的碳排放量(以CO₂计,下同),kg;V为全生命周期的径流总量控制量,m³。

2.2.2 全生命周期碳排放量的计算

计算全生命周期的碳排放量时,计算过程主要包括建设阶段、运行阶段和拆除阶段。建设阶段包括材料生产、建造施工和材料运输阶段的间接碳排放量,运行阶段包括绿地固碳、维护阶段的间接碳排放量和降解 CH_4 与 N_2O 的直接碳排放量。其中,建设阶段以及运行阶段的绿地固碳和维护阶段均通过LID设施的单位面积碳排放量来计算碳排放总量。表1为建设阶段和运行阶段的单位面积碳排放量(负值表示碳汇)。拆除阶段因无法估计其碳排放具体源头和行为,根据相关文献^[9]认为其可按照建设阶段中施工碳排放量的90%进行估算。

表1 各阶段的单位面积碳排放量

Tab.1 Carbon emissions per unit area in each phase

项目	建造施工/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)	建设阶段/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)	绿地固碳/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	维护阶段/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	运行阶段/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)
透水铺装	0.194 0	37.891 0	—	0.017 0	0.017 0
雨水花园	0.662 0	43.850 0	-2.225 5	0.171 0	-2.054 5
普通绿地	—	—	-1.601 8	—	-1.601 8

全生命周期碳排放量为建设阶段、运行阶段与拆除阶段碳排放量之和。计算公式见式(3)~(7)。

$$E = E_1 + E_2 + E_3 \quad (3)$$

$$E_1 = A_1 C_{j1} + A_2 C_{j2} \quad (4)$$

$$E_2 = (A_1 C_{y1} + A_2 C_{y2} + A_3 C_{y3} + E_z) \times 30 \quad (5)$$

$$E_z = \sum (B_{ok} \times M_k) \quad (6)$$

$$E_3 = (A_1 C_{s1} + A_2 C_{s2}) \times 0.9 \quad (7)$$

式中: E 为全生命周期碳排放量, kg ; E_1 为建设阶段碳排放量, kg ; E_2 为运行阶段碳排放量, kg ; E_3 为拆除阶段碳排放量, kg ; A_i 为第 i 种设施的面积,其中, $i=1$ 表示透水铺装的面积, $i=2$ 表示雨水花园的面积, $i=3$ 表示绿地的面积, m^2 ; C_{ji} 为第 i 种设施建设阶段单位面积碳排放量, kg/m^2 ; C_{yi} 为第 i 种设施运行阶段单位面积碳排放量, kg/m^2 ; E_z 为直接碳排放量, kg/m^2 ; k 为污染物的种类; B_{ok} 为考虑不同污染物厌氧分解过程中的排放系数、排放修正因子及全球增温趋势得到的综合系数; M_k 为经过海绵设施处理后的污染物排放量, kg/a ; C_{si} 为第 i 种设施建造施工阶段单位面积碳排放量, kg/m^2 。

2.2.3 全生命周期径流总量控制量的计算

全生命周期径流总量控制量计算公式如下:

$$V = \left(\sum_{i=1}^M \frac{V_{\text{rain},i} - V_{\text{runoff},i}}{P_i} \right) \times \frac{H_a}{\sum_{i=1}^M \frac{H_i}{P_i}} \times 30 \quad (8)$$

式中: V 为全生命周期年径流总量控制量, m^3 ; $V_{\text{rain},i}$ 为降雨重现期为 P_i 的场降雨量, m^3 ; $V_{\text{runoff},i}$ 为设置LID设施后降雨重现期为 P_i 时产生的径流量, m^3 ; M 为设置的重现期个数; P_i 为重现期,本研究取1、2、3、5、10年; H_a 为研究区年平均降雨深度, mm ; H_i 为重现期 P_i 下的场降雨深度, mm 。

2.3 情景模拟

2.3.1 单因素试验

① 气候变化的影响。本研究将气候变化定义为年降雨量的变化^[10]。设置天水市暴雨强度公式在InfoWorks ICM中模拟出的降雨曲线为基态降雨情景C0;在重现期的基础上将降雨强度增加10%、20%,降雨情景记作C10、C20,降低10%、20%的降雨情景记作-C10、-C20,共设置这5种降雨情景,如图3所示。取雨水花园和透水铺装的面积比例均为50%,研究气候变化对碳排放强度的影响。

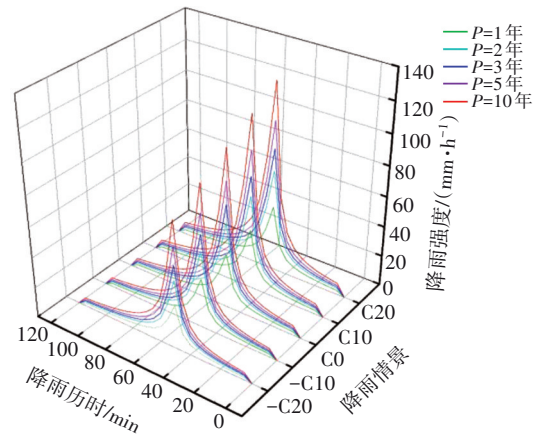


图3 气候变化下各重现期降雨曲线

Fig.3 Rainfall curves for various return periods under climate change

② 透水铺装面积比例的影响。设置雨水花园面积比例为50%,透水铺装面积比例分别取10%、30%、50%、70%、90%,降雨情景选择C0。

③ 雨水花园面积比例的影响。设置透水铺装面积比例为50%,雨水花园面积比例分别取10%、30%、50%、70%、90%,降雨情景选择C0。

2.3.2 正交试验

将透水铺装与雨水花园的面积比例和气候变化进行3因素5水平正交试验,得出25种模拟情景,

找出最优的碳排放强度组合,因素与水平见表2。

表2 正交试验因素与水平

Tab.2 Factors and levels of orthogonal test

水平	因素		
	A:透水铺装 面积比例/%	B:雨水花园 面积比例/%	C:气候变化
1	10	10	-C20
2	30	30	-C10
3	50	50	C0
4	70	70	C10
5	90	90	C20

3 结果与讨论

3.1 单因素对碳排放强度的影响

3.1.1 气候变化的影响

图4为气候变化下全生命周期径流总量控制量和碳排放强度的变化情况。

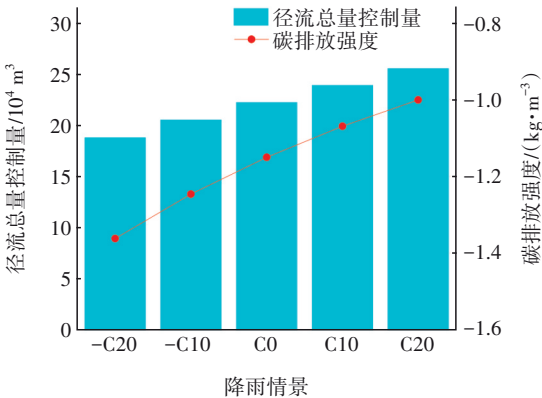


图4 气候变化下的全生命周期径流总量控制量与碳排放强度

Fig.4 Total runoff control volume and carbon emission intensity throughout whole life cycle at climate change

随着降雨量的增加,全生命周期径流总量控制量不断增大,碳排放强度也不断增大,但增大的速率逐渐减缓。当降低10%、20%的降雨强度时,其碳排放强度降低了8.7%、18.3%;当提高10%、20%的降雨强度时,其碳排放强度提高了6.9%、13.0%。当降雨量增大时,进入设施的可控制雨水量增多,使LID设施的径流控制能力得到更充分的利用,因此径流总量控制量也增大,这与Dong等人^[10]的研究结果一致。LID设施的间接碳排放量和碳汇只与设施的规模有关,而与径流总量控制量无关,且该部分为负值,因此,当径流总量控制量增大时,这部分的碳排放强度增大。LID设施的直接碳排放量与径流总量控制量成正比,其碳排放强度为一个定值。

因此,碳排放强度随着径流总量控制量的增大而增大。

3.1.2 LID设施面积比例变化的影响

不同LID设施面积比例下的全生命周期径流总量控制量、碳排放量和碳排放强度如图5所示。随着LID设施面积比例的增大,全生命周期径流总量控制量不断增大,两种LID设施对径流总量控制的效果较为接近,雨水花园的径流总量控制量比透水铺装的高了0.4%。全生命周期碳排放量随着LID设施面积比例的增大而增加,布置LID设施面积比例为50%~90%时,透水铺装的碳排放量增大了22.5%,雨水花园的碳排放量增大了16.7%。LID设施面积比例较大时,透水铺装产生的碳排放量高于雨水花园。

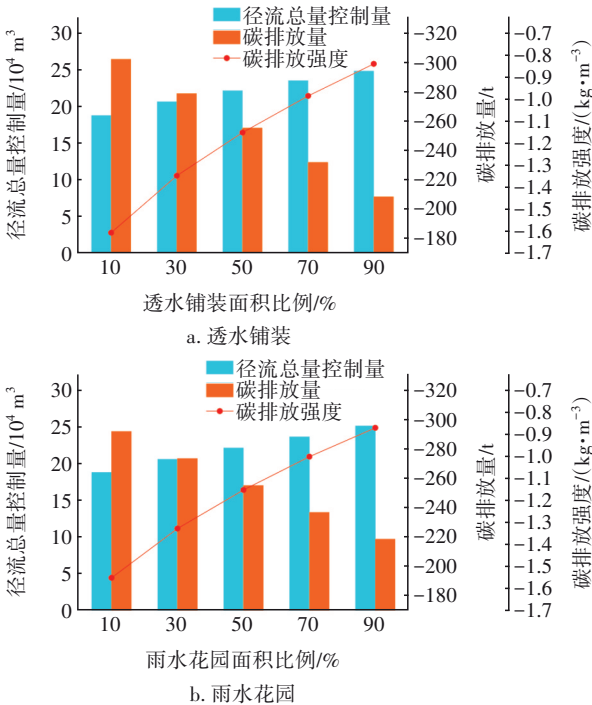


图5 不同LID设施面积比例下的全生命周期径流总量控制量、碳排放量和碳排放强度

Fig.5 Total runoff control volume, carbon emission and carbon emission intensity throughout whole life cycle at different proportions of LID facilities area

图6为透水铺装和雨水花园面积比例均为50%时各阶段的碳排放量(数据单位为t,因直接碳排放只与降雨量有关,故此处不计)。研究区域中人行道及非机动车道和行道树绿带的面积相近,两种LID设施的布置面积也相近。透水铺装建设阶段产生的碳排放量占碳排放总量的98.2%,雨水花园绿

地固碳产生的碳汇(图中为碳汇的绝对值)占碳排放总量的58.1%,其建设阶段的碳排放量占比为41.3%。在建设面积较小时,雨水花园的碳排放量大于透水铺装的碳排放量,随着雨水花园面积的增大,其绿地固碳产生的碳汇量不断增大,碳排放总量则相对减小,最终小于透水铺装的碳排放总量。

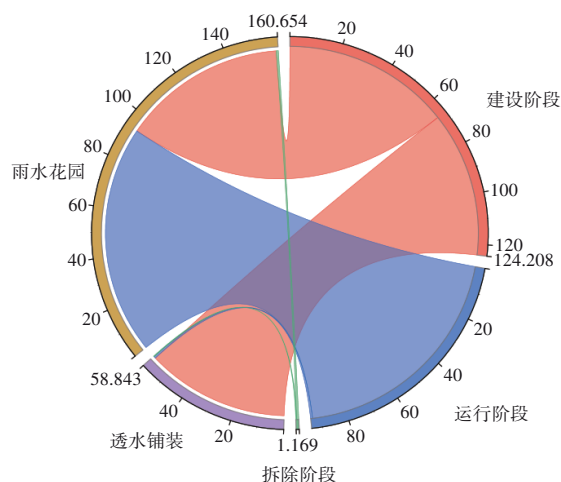


图6 LID设施各阶段碳排放量

Fig.6 Carbon emissions from each phase of LID facility

碳排放强度的变化趋势与碳排放量的变化趋势相近,LID设施面积比例增大所控制的径流量相差较小,随着碳排放量的增大,透水铺装的碳排放强度增大了47.8%,雨水花园的碳排放强度增大了43.9%。透水铺装面积比例小于50%时碳排放强度较小,雨水花园在面积比例大于50%时碳排放强度较小,说明较小面积的透水铺装或较大面积的雨水花园控制单位径流量所排放的碳量较少。

本研究中人行道及非机动车道与行道树绿带的总面积相近,两种LID设施面积比例的变化等同于其面积的变化。由于对碳排放强度的影响是LID设施的面积,因此当人行道及非机动车道与行道树绿带的总面积相差较大时,应以两种LID设施的面积作为因素进行研究。

3.2 正交试验中各因素对碳排放强度的影响

采用正交设计助手II v3.1软件进行极差和方差分析,使用显著性(P 值)检验各因素对碳排放强度的影响。正交试验极差分析结果见表3。可知,在碳排放强度的计算中,极差 $R_A > R_B > R_C$,三个因素的影响次序为:透水铺装面积比例>雨水花园面积比例>气候变化,LID设施面积比例对碳排放强度有显著影响。综合考虑单因素影响分析结果与正交

试验极差分析结果,确定最优组合为 $A_1B_1C_2$,即透水铺装面积比例为10%、雨水花园面积比例为10%、气候变化为-C10。

表3 极差分析结果

Tab.3 Stochastic analysis results

模拟情景	A	B	C	碳排放强度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
1	1	1	1	-2.01
2	1	2	2	-1.80
3	1	3	3	-1.61
4	1	4	4	-1.42
5	1	5	5	-1.34
6	2	1	2	-1.75
7	2	2	3	-1.34
8	2	3	4	-1.38
9	2	4	5	-1.23
10	2	5	1	-0.98
11	3	1	3	-1.55
12	3	2	4	-1.36
13	3	3	5	-1.21
14	3	4	1	-0.95
15	3	5	2	-0.85
16	4	1	4	-1.37
17	4	2	5	-1.20
18	4	3	1	-0.94
19	4	4	2	-0.83
20	4	5	3	-0.74
21	5	1	5	-1.21
22	5	2	1	-0.92
23	5	3	2	-0.82
24	5	4	3	-0.72
25	5	5	4	-0.63
均值 K_1	-1.636	-1.578	-1.160	
均值 K_2	-1.336	-1.324	-1.210	
均值 K_3	-1.184	-1.192	-1.192	
均值 K_4	-1.016	-1.030	-1.232	
均值 K_5	-0.860	-0.908	-1.238	
极差R	0.776	0.670	0.078	

图7为三个影响因素两两之间的交互作用。如图7(a)所示,当透水铺装和雨水花园的面积比例增大时,碳排放强度从P10、R10情景到P90、R90情景增大了69%,两个LID设施面积比例对碳排放强度的影响呈线性关系。碳排放强度从P10、R10情景到P90、R10情景增大了40%,从P10、R10情景到P10、R90情景增大了33%,透水铺装面积比例对碳排放强度的影响要大于雨水花园面积比例。

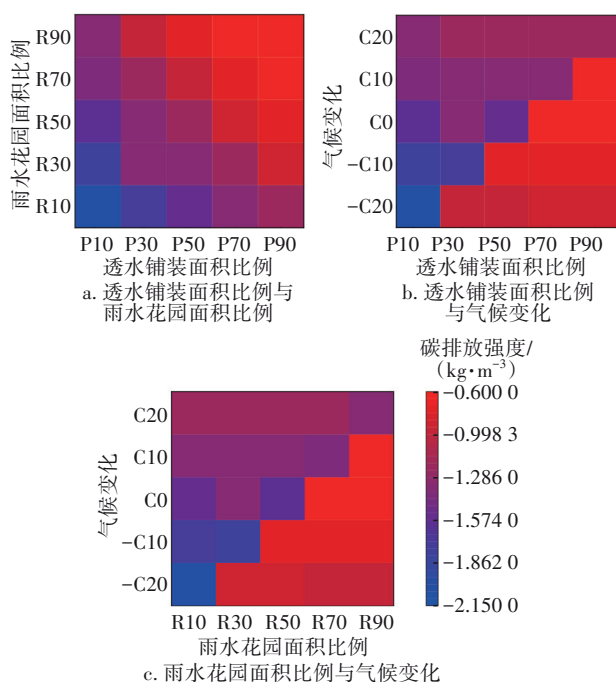


图7 不同因素交互作用下的碳排放强度

Fig.7 Carbon emission intensity under interaction of different factors

在图7(b)中,碳排放强度从P10、-C20情景到P90、-C20情景逐渐增大,在透水铺装面积比例从10%增加到30%时增幅较大,之后则趋于平缓。P90、C20情景的碳排放强度小于P90、C10情景,这是因为C20情景下雨水花园面积比例为10%而C10情景下雨水花园面积比例为90%,雨水花园建设阶段产生的碳排放量较大。图7(c)中雨水花园面积比例和气候变化对碳排放强度的影响与图7(b)中的类似,碳排放强度增大后突然减小也是由于透水铺装面积比例的不同导致的。气候变化对碳排放强度的影响要远远小于LID设施面积比例对碳排放强度的影响。

3.3 LID设施优化布置的碳减排效益

在满足天水市海绵城市建设目标即年径流总量控制率为85%的情况下,若该地块按照碳排放强度最大和最小两种情景布置,则可优化碳排放强度为 0.02 kg/m^3 。天水市城区面积约为 58 km^2 ,年均降雨量约为 501.9 mm ,按照最优方案布置每年可增加 494.87 t 碳汇量。增加的碳汇量能抵消其他碳排放活动产生的碳排放量,或者与其相当的碳汇量见图8。其中燃烧 1 kg 标准煤约排放 2.49 kg CO_2 ,使用 $1 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 电约排放 0.99 kg CO_2 ,普通汽车行驶 1 km

碳排放量约为 $0.18 \text{ kg}^{[11]}$,每人每天代谢产生的碳排放量约为 $0.69 \text{ kg}^{[12]}$, 1 m^2 绿地每天的碳汇量为 0.02 kg ,1棵树每天约吸收 $4.8 \text{ kg CO}_2^{[13]}$ 。由图8可以看出,海绵城市的碳排放优化布置具有较好的碳减排效益。

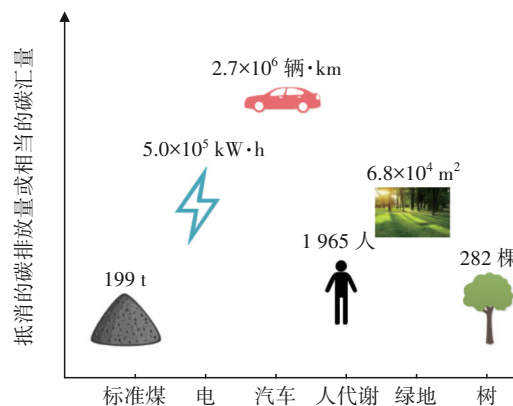


图8 抵消的碳排放量或相当的碳汇量

Fig.8 Offsetting carbon emissions or equivalent carbon sinks

4 结论

① 当年降雨量一定时,面积比例小于50%的透水铺装或面积比例大于50%的雨水花园对碳排放的控制效果较好。

② 当LID设施面积比例一定时,年降雨量越小,对碳排放的控制效果越好。

③ 正交试验结果表明,LID设施面积比例对碳排放强度的影响显著,气候变化对碳排放强度的影响相对较小。其中,透水铺装面积比例对碳排放强度的影响大于雨水花园面积比例对碳排放强度的影响。最优组合为透水铺装面积比例为10%、雨水花园面积比例为10%、降雨情景为-C10。

④ 从碳减排的角度考虑,优先布置最大面积比例的雨水花园,在年径流总量控制率达不到要求时再增加适当面积的透水铺装,此优化布置方案具有较好的碳减排效益。

参考文献:

- [1] 陈菊香,林思彤,孙亮,等.海绵城市建设对碳减排的作用及效益评价探索[J].智能城市,2023,9(5):119-121.
CHEN Juxiang, LIN Sitong, SUN Liang, et al. Exploration of the role of sponge city construction on carbon emission reduction and evaluation of benefits

- [J]. *Intelligent City*, 2023, 9(5): 119-121 (in Chinese).
- [2] 陈菊香, 王楷, 韩云浩, 等. 乌鲁木齐海绵城市建设的碳减排途径探索 [J]. *智能城市*, 2023, 9(6): 57-59.
- CHEN Juxiang, WANG Kai, HAN Yunhao, *et al.* Exploration of carbon emission reduction pathways in Urumqi sponge city construction [J]. *Intelligent City*, 2023, 9(6): 57-59 (in Chinese).
- [3] 贾玲玉. 海绵城市建设的低影响开发技术配置优化与碳减排研究 [D]. 天津: 天津大学, 2017.
- JIA Lingyu. Study on the Configuration Optimization and Carbon Emission Reduction of Low Impact Development in Sponge City [D]. Tianjin: Tianjin University, 2017 (in Chinese).
- [4] 李胜海, 陈思, 白静, 等. 山地城市市政道路低影响开发雨水系统设计与构建 [J]. *中国给水排水*, 2018, 34(20): 60-62.
- LI Shenghai, CHEN Si, BAI Jing, *et al.* Design and construction of stormwater systems for low-impact-development of municipal roads in mountainous city [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(20): 60-62 (in Chinese).
- [5] 刘华超, 梁凤超, 徐薇, 等. 基于InfoWorks ICM的城市排水(雨水)系统排水能力及内涝风险评估 [J]. *城市道桥与防洪*, 2021(12): 71-74.
- LIU Huachao, LIANG Fengchao, XU Wei, *et al.* Drainage capacity and flood risk assessment of urban drainage (stormwater) system based on InfoWorks ICM [J]. *Urban Roads Bridges & Flood Control*, 2021(12): 71-74 (in Chinese).
- [6] 戎贵文, 甘丹妮, 李姗姗, 等. 不同LID设施的面积比例优选及径流污染控制效果 [J]. *水资源保护*, 2022, 38(3): 168-173.
- RONG Guiwen, GAN Danni, LI Shanshan, *et al.* Area proportion optimization of different LID facilities and effect of runoff pollution control [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(3): 168-173 (in Chinese).
- [7] 蒋海红. 基于InfoWorks ICM模型的万州城区海绵城市试点建设雨水径流总量模拟分析 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.
- JIANG Haihong. Simulation of Total Rainwater Runoff before and after the Sponge City Pilot Construction in Wanzhou City Based on InfoWorks ICM Mode [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2019 (in Chinese).
- [8] 戎贵文, 李姗姗, 甘丹妮, 等. 不同LID组合对水质水量影响及成本效益分析 [J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(1): 21-29.
- RONG Guiwen, LI Shanshan, GAN Danni, *et al.* Impact of different low impact developmental combinations on water quality and cost-benefit analysis [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2022, 20(1): 21-29 (in Chinese).
- [9] 张孝存. 绿色建筑结构体系碳排放计量方法与对比研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- ZHANG Xiaocun. Carbon Emissions Measureant Methods and Comparative Studies on Green Building Structural System [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014 (in Chinese).
- [10] DONG X, GUO H, ZENG S. Enhancing future resilience in urban drainage system: green versus grey infrastructure [J]. *Water Research*, 2017, 124: 280-289.
- [11] 田佩宁, 陈硕, 毛保华, 等. 新能源汽车对中国私家车碳排放的影响 [J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2023, 43(5): 88-89.
- TIAN Peining, CHEN Shuo, MAO Baohua, *et al.* Impact of new energy vehicles on carbon emissions of private cars in China [J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2023, 43(5): 88-89 (in Chinese).
- [12] LI M, BEKÖ G, ZANNONI N, *et al.* Human metabolic emissions of carbon dioxide and methane and their implications for carbon emissions [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 833: 155241.
- [13] 张岚, 宋钰红, 张慧琳, 等. 城市森林碳汇及估算方法比较 [J]. *现代园艺*, 2023, 46(11): 73-78.
- ZHANG Lan, SONG Yuhong, ZHANG Huilin, *et al.* Comparison of urban forest carbon sinks and estimation methods [J]. *Contemporary Horticulture*, 2023, 46(11): 73-78 (in Chinese).

作者简介: 李欢(1998-), 男, 甘肃白银人, 硕士研究生, 研究方向为海绵城市。

E-mail: 12211100@stu.lzjtu.edu.cn

收稿日期: 2023-10-21

修回日期: 2024-02-20

(编辑: 刘贵春)