

基于碳污协同影响的西安市宅旁绿地优化设计研究

苟文雅, 赵敬源, 马西娜

(长安大学 建筑学院, 陕西 西安 710061)

摘要: 宅旁绿地对居住区碳排放和室外 PM_{2.5} 扩散分布都有重要的影响, 不同的宅旁绿地形式通过调节微气候影响建筑能耗和碳排放, 加之植物自身的碳汇功能, 带来综合减碳量的变化。通过将微气候和建筑能耗进行耦合, 对 13 种工况下不同绿地面积和绿地形式进行了模拟核算和相关性分析, 研究表明: 节能碳汇随着绿地面积的增大而增大, 但绿地率超过 35% 后节能碳汇基本维持稳定, 植物碳汇则随着绿地面积增大而持续增大, 呈现数倍于其节能碳汇的趋势。宅旁绿地影响下的 PM_{2.5} 扩散分布和住宅建筑碳核算具有显著相关性, 基于碳污协同影响, 西安市宅旁绿地优先推荐乔灌形式, 其次为乔灌草, 最不利形式为乔草, 绿地率为 35% 的乔灌形式绿地为经济与生态效益综合最优方案。

关键词: 绿地面积; 绿地形式; 节能碳汇; 植物碳汇; 综合碳汇

中图分类号: TU985.12

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2022)03-0450-09

Study on the optimal design of green space next to houses in Xi'an based on the synergistic influence of carbon and pollution

GOU Wenya, ZHAO Jingyuan, MA Xina

(School of Architecture, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: The green space next to the house has an important impact on residential carbon emissions and outdoor PM_{2.5} diffusion distribution. Different forms of residential green space affect building energy consumption and carbon emissions by regulating microclimate, and plants have the carbon sink function, thus bringing about changes in comprehensive carbon reduction. Through coupling microclimate and building energy consumption, this paper conducts simulation accounting and correlation analysis on different green space area and green space form under 13 working conditions. The research finds that: The energy-saving carbon sink increases with the increase of green space area, but the energy-saving carbon sink basically remains stable when the green space rate exceeds 35%, while the plant carbon sink continues to increase with the increase of green space area, showing a trend several times larger than its energy-saving carbon sink. There is a significant correlation between PM_{2.5} diffusion distribution under the influence of green space near houses and carbon accounting of residential buildings. Based on the synergistic effect of carbon and pollution, the green land near houses in Xi'an was recommended as the form of tree-shrub first, followed by tree-shrub-grass, and the most unfavorable form was tree-grass. The rate of green land was 35% and the green land in the form of tree-shrub was the best comprehensive scheme of economic and ecological benefits.

Key words: greenery area; green space form; energy saving carbon sink; plant carbon sink; integrated carbon sink

绿地作为城市人居环境中具有生态平衡功能并且与人类生活密切相关的绿色空间^[1], 在吸收和储存二氧化碳以及降低大气中 PM_{2.5} 浓度方面均发挥着重要作用。宅旁绿地在居住区绿地中面积占比最大^[2], 居住用地内紧邻住宅建筑周边的绿地统称为宅旁绿地^[3], 其作为城市居住区绿化的主要

组成部分, 是最普遍的居住区绿化形式, 与住宅的关系最为密切。合理的宅旁绿地设计对利用有限的城市绿地空间, 更好地发挥其减碳降污的协同作用, 促进城市低碳健康发展具有重要的意义^[4]。

绿地与碳排放及 PM_{2.5} 扩散三者之间相互影

收稿日期: 2021-08-05

修改稿日期: 2022-03-31

基金项目: 陕西省创新计划基金(2020TD-029); 国家自然科学基金资助项目(51908039)

第一作者: 苟文雅(1993—), 女, 硕士生, 研究方向建筑技术科学. E-mail: gwy9009@163.com

通信作者: 赵敬源(1972—), 女, 博士, 教授, 主要研究绿色建筑与城市生态环境. E-mail: zjyqtt@163.com

响的复杂关系,相关研究主要集中于以下三方面:(1)绿地对碳排放的影响,李辉等^[5]、吴紫琪^[6]、冀媛媛等^[7]、白一飞等^[8]分别从绿地的释氧固碳效应、碳汇能力、景观运行碳排与植物碳汇的比较、街区碳汇的重要性等角度表明了绿地的合理设计对于居住区碳排放的重要影响作用。但该部分已有研究主要集中于分析绿地自身的碳汇效能对居住区碳排放的影响,而对绿地通过调节建筑周围微气候影响建筑物能耗变化从而引起的碳排放变化则研究较少。(2)绿地对PM_{2.5}扩散浓度的影响,陈明等^[9]和张珂凡^[10]分别从城市绿地空间形态与绿地景观格局方面对PM_{2.5}的扩散影响进行研究,结果表明绿地空间形态与景观格局均对PM_{2.5}扩散浓度有显著影响,但此类研究大多以城市和街区等大、中尺度为研究对象,研究模型多为模块化简化模型,鲜有以宅旁等小尺度区域作为对象进行精细化研究。(3)碳排放与PM_{2.5}扩散浓度之间的相关研究,韩道汶等^[11]、于建华等^[12]、常树诚等^[13]分别对空气中PM_{2.5}的碳组成特征进行分析以及从碳协同减排视角对政策制定者在空气质量改善策略方面提出要求,该部分现有研究较少且集中关注环境科学视角,缺少可供园林绿地设计参考的形态设计参数。

综上,从碳污协同影响的角度优化宅旁绿地设计,对当前双碳背景下更好地发挥居住区绿地生态效应具有重要的理论与工程实践价值,为此,本文通过对西安市居住区宅旁绿地进行调研,建立了不同绿地率控制下的典型宅旁绿地模型,利用微气候模拟软件及建筑能耗模拟软件耦合,探究城市居住区内不同宅旁绿地通过调节宅旁微气候进而对住宅运行碳排放和PM_{2.5}扩散产生的不同影响,以期从两者协同视角下以宅旁绿地设计为切入点为居住区节能减排提供科学依据。

1 研究方法

1.1 耦合影响机理

绿化会对组团的微气候环境产生影响^[14-16],适宜的绿化可有效改善居住区中建筑周边的温度场和风场,从而直接影响到住宅建筑的运行能耗^[17-18],影响住宅建筑的运行碳排放,即通过节约能耗来降低建筑物的运行碳排放实现节能碳汇;加之绿化本身的植物碳汇作用,形成综合减碳效应。

PM_{2.5}的扩散浓度也受到微气候环境的影响,风速、温度、相对湿度等环境因素的变化均与PM_{2.5}扩散浓度呈现显著相关性^[19-22],宅旁绿地通过对宅旁微气候的调节作用影响住宅建筑物周围PM_{2.5}的扩散浓度。因而本次研究以宅旁绿地及建筑物周围微气候作为媒介因素展开,以此确定对住宅碳排放核算与住宅周围PM_{2.5}扩散浓度之间协同研究的有效性,如图1所示,最终以PM_{2.5}扩散分布浓度及综合碳汇作为协同判据,确定适宜宅旁绿地设计策略。

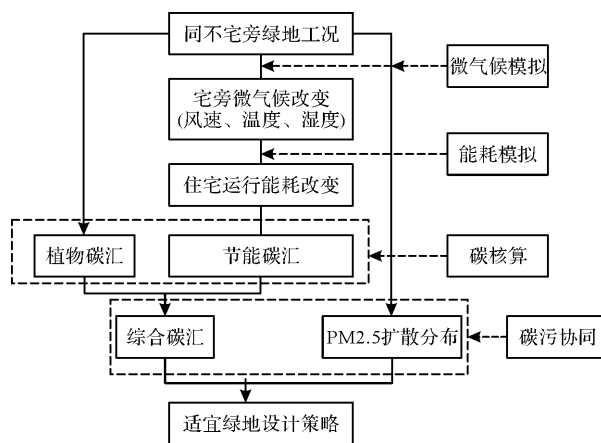


图1 研究框架

Fig. 1 Research framework

1.2 碳排放核算

碳排放核算是对研究对象的碳排放趋势及其影响因素进行评估的基础,碳排放核算需要同时对研究对象的碳源及碳汇进行考虑。针对本次研究,碳源主要为住宅建筑运行过程中所产生的碳排放,碳排放核算方法使用碳排放因子法,该方法来源于IPCC出版的《2006年国家温室气体清单指南》,其基本思路是使用碳排放因子(EF)与建筑物的能源消耗量(AD)相乘,进而得出二氧化碳排放量(E_m),对建筑物碳排放进行量化^[23],计算公式为

$$E_m = AD \times EF$$

本文通过模拟得出不同绿地工况影响下的建筑物全年能耗,乘以陕西省电力二氧化碳排放因子 $0.769\ 0\ \text{kgCO}_2/\text{kw} \cdot \text{h}$ ^[24],可得不同绿地工况影响下建筑物的全年运行碳排放量。通过无绿地基本工况全年运行碳排放量减去各绿地工况全年运行碳排放量得到各绿地工况节能碳汇(S_e),即节能碳汇(S_e)为各宅旁绿地工况影响建筑能耗降低产生的碳汇;节能碳汇(S_e)与绿化工况自身的植物碳汇(S_p)相加,得到各绿地工况的综合碳汇(S_c),计算公式为

$$S_c = S_e + S_p$$

本次研究根据西安市住区常见植物^[6], 确定工况中绿化植物采用乔木-女贞、灌木-小叶黄杨、草坪-早熟禾。女贞的碳汇量每棵为 149.88 kg/a^[25], 小叶黄杨碳汇量每平方米为 7.53 kg/a^[26], 早熟禾碳汇量为每平方米为 4.02 kg/a^[27], 结合各绿地工况中乔木数量及灌木和草坪面积可得各工况全年植物碳汇量。通过节能碳汇量与植物碳汇量得到各工况综合碳汇量, 最终使用综合碳汇量大小对各工况减碳效果进行评价比选。

2 研究模型

2.1 绿地基础模型

通过对西安市 188 个居住区宅旁绿地情况进行调研, 选取其中典型居住区进行测试, 并依据测试小区建立住区基础模型, 建筑布局形式为点群式, 住宅建筑均为 6 层, 高度 18 m, 建筑平面形式为矩形, 宅旁绿地模型相对主体建筑为四周布置; 宅旁绿地模型主要参数包括绿地面积与绿地形式两部分, 宅旁绿地面积由居住区绿地率决定, 根据《城市居住区规划设计标准》GB50180-

2018^[28]中规定的西安市不同建筑类别的居住区绿地率最小值为 23%~35%, 对不同绿地率居住区进行分类调研, 确定了四种典型绿地率 25%、30%、35%、45% 及其控制下的宅旁绿地面积, 结合目前西安市居住区内最常见的三种绿地形式乔灌、乔草、乔灌草, 同时参考陈自新等^[29]对楼间绿地种植模式的研究成果建立宅旁绿地模型。

2.2 参数设置

模型建筑参数与实测住宅楼栋保持一致, 气象数据以中国标准气象数据(CSWD)中西安市典型气象年作为初始天气数据, 选择典型气象日作为 Envi-met 软件的输入气象条件, 模拟不同绿地工况影响下的宅旁微气候变化, 然后将 Envi-met 模拟结果中建筑周围逐时平均气温、相对湿度和平均风速输出作为二次能耗模拟的边界条件, 模拟不同宅旁绿地面积及绿地形式影响下的建筑物冷热负荷及能耗量的变化, 能耗模拟与微气候模拟使用相同典型模型, 以满足后续协同分析的数据要求。具体模拟参数设置见表 1:

表 1 软件参数设置

Tab. 1 Software parameter Settings

Envi-met 参数设置		Designbuilder 参数设置	
经纬度	北纬 34.26°, 东经 108.93°	建筑平面形式	矩形
模拟开始时间	当日 0 时	建筑高度	18 m
模拟持续时间	24 h	体形系数	0.283
网格分辨率	等距 $x=y=z=1.5$ m	窗墙比	东西 0.022、南 0.264、北 0.411
初始空气温度/相对湿度	根据不同季节典型气象日确定	传热系数 $K[W/(m^2 \cdot K)]$	墙体 0.68、屋面 0.45、外窗 2.5
10 m 处风速	气象风速 1.47 m/s	渗透换气率 ac/h	0.5
风向	45°(东北)	太阳能得热系数 SHGC	0.556

2.3 模型验证

为了验证模型设置的准确性, 将模拟所得的人行高度(1.5 m)处空气温度、相对湿度以及 PM2.5 浓度与实测值进行对比, 分析模拟值与实测值趋势变化及差值大小。

测试建筑位于西安市莲湖区旭景新港小区, 小区以多层住宅为主, 测试时间冬季为 2021 年 1 月 8 日 12:00—1 月 11 日 11:00, 夏季为 2021 年 7 月 30 日 12:00—8 月 2 日 11:00, 测试时长均为 72 h, 测试期间天气晴朗且前后几日无降雨, 为西安市冬夏季典型气象, 实验设置五个监测点, 测点 1 位于小区中心绿地区域, 测点 2 位于广场硬质铺装区域, 测点 3 位于宅旁绿地区域, 测点 4 位

于宅旁乔灌草区域, 测点 5 位于宅旁硬质铺装区域。测点高度均为 1.5 m, 测试中温度、湿度与风速的测量同步进行, 使用 TES1341 测试仪来测量, 人工记录数据; PM2.5 的测试与温湿度和风速的测试同时进行, 使用的是英国 CASELLA CEL-712 粉尘测定仪。

根据实测住宅设计参数及其周围现状, 建立 Envi-met 模型, 模拟开始与持续时间均与实测相同。模拟边界条件来源于西安市气象站公布的气象环境数据及国控站点空气质量监测数据, 模型内植物高度和树冠宽度根据现场实际情况确定。对比结果见图 2、图 3, 篇幅所限只取部分典型时刻的数据对比。

将模拟与实测数据进行对比, 空气温度、湿度及 PM2.5 浓度的模拟值与实测值变化趋势一致. 由图 2、图 3 可以看出, 温度模拟结果与实测值的平均差值为 0.2 ℃, 小于同一测点实测值变化幅度的 3%; 湿度模拟结果与实测值平均差值为 1.88%, 差异值不足 2%; PM2.5 浓度模拟结果与实测值之间的平均差值为 11.57, 差异值不足实测平均浓度值的 3%, 因此该模型的参数和边界条件设置合理, 可以利用该模型进行不同宅旁绿地工况的比较研究.

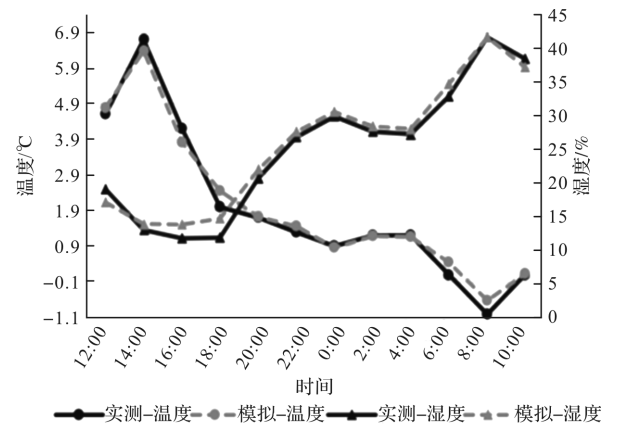


图 2 温度、湿度对比

Fig. 2 Comparison of temperature and humidity

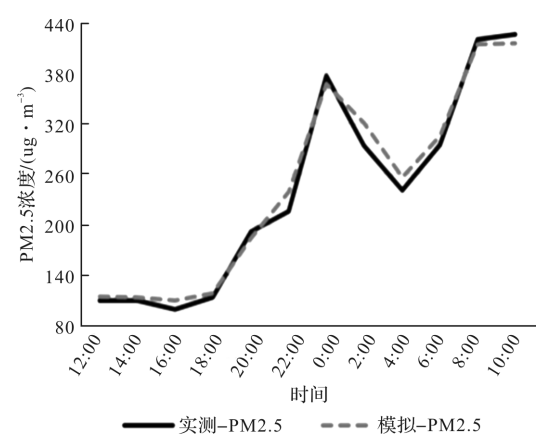


图 3 PM2.5 浓度对比

Fig. 3 PM2.5 concentration comparison

2.4 研究工况

研究工况共确定了 13 种, 包括 1 个无绿地的基本工况和 12 种不同的宅旁绿地工况, 各宅旁绿地工况除绿地面积及绿地形式变化外, 其余模拟条件均相同; 宅旁绿地平面布局相对目标建筑均为四周布置, 工况中乔木高度均为 5 m, 灌木高 1 m, 草高 0.2 m, 乔木数量在绿地面积相同时保持不变, 灌木与草坪面积比在乔灌木草工况中均为 1 : 1, 其余工况为整体覆盖. 具体工况设置见表 2:

表 2 模拟工况设置

Tab. 2 Simulated working conditions settings

工况	绿地率/%	宅旁绿地面积/m ²	绿地形式	植物数量/面积		
				乔木/棵	灌木/m ²	草坪/m ²
基本工况 A0	0	0	无绿化(A0)	0	0	0
工况 1(B25)	25	450	乔灌(B)	15	450	0
工况 2(C25)			乔草(C)	15	0	450
工况 3(D25)			乔灌草(D)	15	225	225
工况 4(B30)	30	850	乔灌(B)	28	850	0
工况 5(C30)			乔草(C)	28	0	850
工况 6(D30)			乔灌草(D)	28	425	425
工况 7(B35)	35	1 350	乔灌(B)	45	1 350	0
工况 8(C35)			乔草(C)	45	0	1 350
工况 9(D35)			乔灌草(D)	45	675	675
工况 10(B45)	45	1 600	乔灌(B)	53	1 600	0
工况 11(C45)			乔草(C)	53	0	1 600
工况 12(D45)			乔灌草(D)	53	800	800

3 模拟结果及数据分析

3.1 微气候对比分析

图 4 为各绿地工况影响下的微气候因素对比. 由图可以看出不同宅旁绿地面积和绿地形式对宅旁微气候的改善效果不同. 从不同绿地率控制下的宅旁绿地面积来看, 绿地率由 25% 增加到 30% 的过程中, 对风速的改善并不明显, 但对温度与

湿度的影响增大; 由 30% 增至 35% 时, 对微气候的影响显著增大; 由 35% 增加至 45% 时, 对温度的影响增幅较大, 而对风速及湿度的影响增幅则较小. 从不同绿地形式分析, 对风速的降低作用乔灌>乔灌草>乔草, 对温度及湿度的影响, 在绿地率 25% 时对温度的影响乔草>乔灌>乔灌草, 对湿度的影响乔灌>乔草>乔灌草, 绿地率 30% 及以上时对温度及湿度的影响均为乔灌>乔灌草

> 乔草.

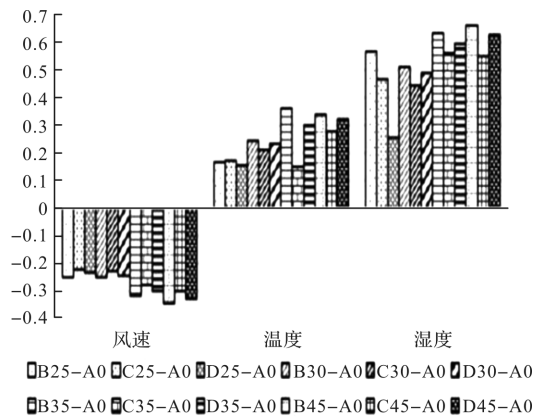


图4 微气候因素对比

Fig. 4 Comparison of microclimate factors

3.2 PM_{2.5} 扩散分析

图5为各绿地工况影响下的住宅周围PM_{2.5}扩散浓度。图中各工况PM_{2.5}浓度均小于A0,可知各工况在全年均可降低住宅周围平均PM_{2.5}浓度,并且由图可以看出绿地对PM_{2.5}浓度的降低效果呈现季节性差异,其影响效果按季节排序为秋季>夏季>春季>冬季。从宅旁绿地面积来看,随着绿地率增大时宅旁绿地面积的逐渐增加,各工况对PM_{2.5}浓度的降低作用亦随之增大,即宅旁绿地面积越大,住宅周围PM_{2.5}浓度也越低。从不同绿地形式来看,面积相同的情况下不同绿地形式对PM_{2.5}浓度的降低效果为乔灌>乔灌草>乔草。即,宅旁绿地对住宅周围PM_{2.5}扩散浓度的降低作用在秋季更为明显,平均降低浓度值为0.39 ug/m³;增大宅旁绿地面积也可降低住宅周围PM_{2.5}扩散浓度;在绿地面积一定的情况下,乔灌形式绿地降低PM_{2.5}扩散浓度效果最好,其次是乔灌草形式,乔草形式效果较差,模型工况下,乔灌形式绿地的PM_{2.5}浓度降低幅度平均为乔草形式的120%。

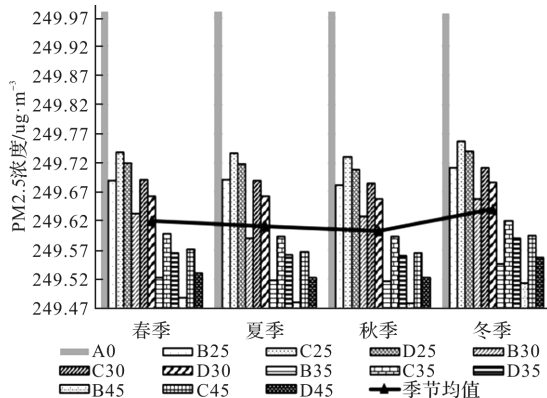


图5 PM_{2.5} 扩散浓度对比

Fig. 5 Comparison of PM_{2.5} diffusion concentration

3.3 碳汇影响分析

图6为各绿地工况影响下的住宅全年运行能耗对比图,由图可知,以无绿地基本工况(A0)建筑能耗量为基准,各绿地工况均通过宅旁微气候调节作用降低了建筑能耗,其中节约能耗最多的工况为绿地率35%时的乔灌绿地形式,可节约能耗5332.79 kw·h/a。

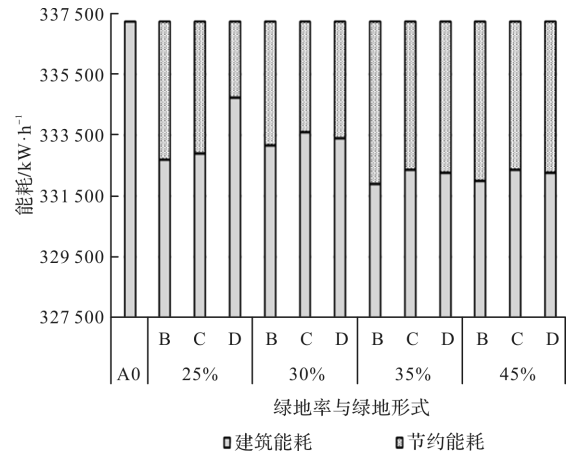


图6 建筑能耗对比

Fig. 6 Comparison of building energy consumption

从宅旁绿地面积来看,绿地率由25%增大至45%,当绿地形式为乔灌与乔草时,35%时节能最多能耗最低,45%次之;绿地形式为乔灌草时,住宅能耗随着绿地面积增加一直呈下降趋势,在25%时能耗最高节能最少,节能量为2504.63 kw·h/年,45%时能耗最低节能最多,节能量接近绿地率25%时的两倍,这是因为随着绿地率增大,宅旁绿地面积逐渐增加,绿植可以在更大范围内发挥其微气候调节作用。

从不同绿地形式来看,在绿地面积相同的情况下,乔灌形式相比其他两种形式影响下的建筑能耗最低,节能量最大,这是因为种植面积相同时,灌木的三维绿量远高于草坪,因此灌木所占面积较大时对微气候的调节作用更显著;乔草与乔灌草两种形式略有不同,在绿地率为25%时,乔草形式影响的建筑能耗低于乔灌草,绿地率为30%及以上时,乔灌草形式影响的建筑能耗则低于乔草,与乔草与乔灌草对温湿度的影响结果相一致,进一步证实了宅旁绿地通过微气候调节影响建筑物能耗的有效性。

图7为各绿地工况影响下的节能碳汇、植物碳汇及综合碳汇对比图。如图,节能碳汇曲线随着绿地率增大到35%后趋于平稳,植物碳汇曲线则随着绿地率的增大持续上升,二者在绿地率为25%且绿地形式为乔草时接近1:1,表明该工况

下绿地发挥的节能效应与其固碳效应基本持平; 绿地率超过 25% 及以上时, 植物碳汇为节能碳汇的 2~4 倍不等, 在绿地率 45% 且绿地形式为乔灌时, 差值达到最大, 为节能碳汇的 4 倍以上, 表明绿地率超过 25% 后, 植物的生态效应主要体现在其本身的固碳作用。

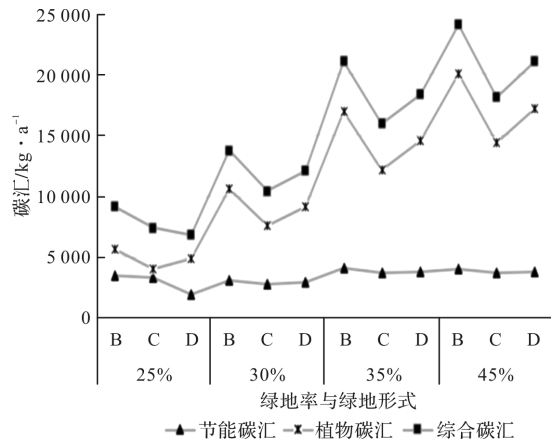


图 7 综合碳汇对比

Fig. 7 Comparison of integrated carbon sinks
在绿地面积相同的情况下, 乔灌形式相比其他

两种形式的节能碳汇和植物碳汇均为最大, 因而其综合碳汇也最大. 乔草与乔灌草的节能碳汇在不同绿地率工况下呈现不同的变化趋势, 绿地率 25% 时乔草的节能碳汇大于乔灌草, 而绿地率超过 25% 时乔灌草的节能碳汇大于乔草, 结合植物碳汇的变化可知, 当绿地面积相对较小时, 绿地减碳作用乔灌>乔草>乔灌草, 当绿地面积相对较大时, 绿地减碳作用乔灌>乔灌草>乔草。

由图 7 还可以看出, 绿地率 35% 的乔灌形式绿地综合碳汇效益较大, 甚至明显大于绿地率 45% 的乔草及乔灌草形式绿地, 绿地率 35% 的乔灌草形式综合碳汇与绿地率 45% 的乔草形式几乎相等, 因此从碳汇影响角度, 绿地率 35% 时的乔灌形式绿地综合优势明显, 其次为相同条件下的乔灌草形式绿地。

4 碳污协同影响解析

4.1 相关性分析

对各工况碳核算因素与 PM2.5 浓度进行相关性分析, 结果如表 3 所示:

表 3 PM2.5 浓度与碳核算因素相关性分析

Tab. 3 Correlation analysis of PM2.5 concentration and carbon accounting factors

相关系数	变量	建筑能耗	节能碳汇	植物碳汇	综合碳汇	PM2.5 浓度
Pearson	建筑能耗	1				
	节能碳汇	-1.000**	1			
	植物碳汇	-0.789**	0.789**	1		
	综合碳汇	-0.846**	0.846**	0.995**	1	
	PM2.5 浓度	0.920**	-0.920**	-0.940**	-0.964**	1

从表 3 可以看出, 建筑物周围 PM2.5 扩散浓度和建筑能耗的 Pearson 相关系数为 0.920, 相伴概率小于 0.01, 则表示在 0.01 的显著性水平上极显著, 则说明建筑物周围 PM2.5 扩散浓度与建筑能耗呈显著正相关, 同理 PM2.5 浓度与节能碳汇、植物碳汇、综合碳汇之间则均呈显著负相关. 各碳排放指标与 PM2.5 扩散浓度之间的显著相关性也说明了本次研究中碳污协同分析的合理性与必要性。

4.2 碳污协同影响分析

从碳汇影响分析结果来看, 最节能的设计策略不一定为最节碳的策略, 从图 6、图 7 可以看出, 在本次模拟 12 种绿地工况中, 绿地率为 35% 且绿地形式为乔灌时最节能, 其节能碳汇最大, 但加入植物碳汇后, 其综合碳汇效果次于绿地率 45%, 绿地率为 45% 且绿地形式为乔灌时最节碳, 同时绿地率为 25% 且绿地形式为乔灌草时其能耗

改善和减碳效应均为最差. 在碳中和目标下, 碳汇主要以植物吸收和存储二氧化碳的能力为主, 因此针对宅旁绿地设计策略的研究, 更应该以节碳作为主要实现目标。

针对不同的绿地率, 从节碳角度来看, 绿地率越大, 其综合碳汇量越高, 节碳效果越好; 从低污来看, PM2.5 扩散浓度也随着绿地率的增大而降低; 故从碳污协同角度综合考虑, 绿地面积的增大对减碳和降污都有明显的改善效果, 二者总体趋势为绿地率在 35% 之前增大时, 其减碳和降污效果随之增加幅度较大, 35% 之后仍随之增加, 但增幅明显减弱。

针对不同的绿地形式, 从节碳角度来看, 绿地率为 25% 时, 节碳效果乔灌>乔草>乔灌草, 绿地率超过 25% 时, 节碳效果乔灌>乔灌草>乔草; 从低污来看, 绿地面积相同时, 各绿地形式对宅旁 PM2.5 浓度的降低作用均为乔灌>乔灌草

> 乔草。故从碳污协同角度考虑, 优先推荐宅旁绿地形式为乔灌, 其次为乔灌草, 最不利的绿地形式为乔草。

近年来, 西安城市绿地建设发展较快, 同时用地问题和经济问题也日益突出, 因此在园林绿地设计中平衡经济、社会、生态等方面的效益也是推荐适宜绿地策略时需要考虑的问题。通过对12种模拟工况进行碳污协同分析, 绿地率35%时乔灌形式的减碳和降污效果仅次于绿地率45%时的乔灌形式, 但优于绿地率45%时的乔灌草与乔草形式; 同时绿地率从35%增加到45%, 宅旁绿地面积平均增加250 m², 但其对宅旁微气候调节发挥的作用有限, 节能碳汇并未增加, 仅植物固碳作用发挥其生态效益。因此综合考虑经济因素、社会因素和生态效应, 绿地率为35%的乔灌形式绿地为西安市住区宅旁绿地的推荐方案。

5 结论与展望

住宅作为基本的居住单元, 住宅运行能耗的控制与宅旁环境的改善对城市居住区低碳发展与居住品质的提高有着极其重要的影响, 同时居住区绿地更好地发挥碳汇作用提高生态效益也是目前双碳背景下居住区绿地设计亟待解决的问题。本文通过对不同宅旁绿地工况影响下的住宅碳排放和宅旁PM_{2.5}扩散进行分析, 以期从碳污协同角度, 以城市居住区低碳健康发展为目标为居住区宅旁绿地设计提供参考, 主要结论如下:

(1) 增大宅旁绿地面积和适宜的宅旁绿地形式对住宅建筑碳排放及碳汇均起到积极作用, 从绿地面积来看, 绿地率45%时, 综合碳汇量最高。从绿地形式分析, 绿地面积相同的情况下, 乔灌形式影响下的综合碳汇量最高;

(2) 宅旁绿地对住宅周围PM_{2.5}扩散浓度的降低作用受季节影响秋季>夏季>春季>冬季, 宅旁绿地面积越大对PM_{2.5}浓度的降低作用越好, 三种绿化形式对PM_{2.5}扩散分布的改善作用为乔灌>乔灌草>乔草;

(3) 最节能设计策略不一定为最节碳策略, 从绿地率来看, 绿地率35%时最节能, 绿地率45%时最低碳; 绿地面积相同的条件下, 乔灌形式绿地的节能节碳效果均优于乔草和乔灌草绿地;

(4) 基于碳污协同影响, 在相同条件下, 宅旁绿地形式优先推荐乔灌形式, 其次为乔灌草, 最不利形式为乔草形式, 综合考虑生态效应和经济性, 绿地率为35%的乔灌形式绿地为西安市住区

宅旁绿地的推荐方案。

参考文献 References

- [1] 赵敬源, 马西娜. 城市绿地系统规划中生态评价体系的构建[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2015, 47(3):392-397.
ZHAO Jingyuan, MA Xina. Construction of ecological evaluation system for the urban green space system planning[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2015, 47(3):392-397.
- [2] 何文惠. 成都市高层住宅区宅旁绿地植物配置研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
HE Wenhui. A study of plant design in landscape design next to the house in high-rise residential area in chengdu city[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 居住绿地设计标准: CJJ/T294-2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for the design of residential green space: CJJ/T294-2019[S]. Beijing: China Architecture Publishing & Media Co. Ltd., 2019.
- [4] 邓冬旺. 碳汇理念下城市绿地建设策略探析[J]. 防护林科技, 2019(5):88-90.
DENG Dongwang. Urban green space construction strategy under the concept of carbon sink[J]. Protection Forest Science and Technology, 2019(5):88-90.
- [5] 李辉, 赵卫智, 古润泽, 等. 居住区不同类型绿地释氧固碳及降温增湿作用[J]. 环境科学, 1999(6):41-44.
LI Hui, ZHAO Weizhi, GU Runze, et al. Effects of three different green-lands in plantation structure on the O₂-Emitting CO₂-fixing heat-absorbing and temperature-decreasing in residential quarters[J]. Environmental Science, 1999(6):41-44.
- [6] 吴紫琪. 基于低碳理念的城市住区绿化空间设计优化策略—以西安市高新区为例[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2018.
WU Ziqi. Optimization strategy of urban residential greening space design based on low carbon concept: Taking Xi'an hi-tech industries development zone as an example[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2018.
- [7] 冀媛媛, 李双跃, 刘海荣. 基于低碳视角下园林景观运营维护阶段非一次性碳源与碳汇比较研究[J]. 安徽建筑, 2020, 27(8):132-133, 199.
JI Yuanyuan, LI Shuangyue, LIU Hairong. A comparative study of non-disposable carbon sources and

- carbon sinks in landscape operation and maintenance from the perspective of low carbon[J]. *Anhui Architecture*, 2020, 27(8):132-133, 199.
- [8] 白一飞,刘加平,张伟荣,等.以城市街区建筑为对象的低碳技术方法[J]. *工业建筑*, 2020, 50(7):166-174.
BAI Yifei, LIU Jiaping, ZHANG Weirong, et al. Low-carbon technique methods for urban block buildings[J]. *Industrial Construction*, 2020, 50(7):166-174.
- [9] 陈明,胡义,戴菲.城市绿地空间形态对PM_{2.5}的消减影响-以武汉市为例[J]. *风景园林*, 2019, 26(12):74-78.
CHEN Ming, HU Yi, DAI Fei. Influence of urban green space forms on PM_{2.5} reduction: A case study of wuhan[J]. *Landscape Architecture*, 2019, 26(12):74-78.
- [10] 张珂凡.城市绿地景观格局与PM_{2.5}浓度分布响应的研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2020.
ZHANG Kefan. Study on the correlation with urban green space landscape pattern and PM_{2.5} concentration distribution: A case of Xi'an[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2020.
- [11] 韩道汶,王思晴,安伟.济南市环境空气中PM_{2.5}的碳组成与特征分析[J]. *中国环境管理干部学院学报*, 2012, 22(4):42-44.
HAN Daowen, WANG Siqing, AN Wei. The analysis on the characteristics of the carbon composition of PM_{2.5} in Jinan atmosphere[J]. *J. of EMCC*, 2012, 22(4):42-44.
- [12] YU Jianghua, CHEN Tian, BENJAMIN Guinot, et al. Characteristics of carbonaceous particles in Beijing during winter and summer 2003[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2006, 23:468-473.
- [13] 常树诚,郑亦佳,曾武涛,等.碳协同减排视角下广东省PM_{2.5}实现WHO-II目标策略研究[J]. *环境科学研究*, 2021, 34(9):2105-2112.
CHANG Shucheng, ZHENG Yijia, ZENG Wutao, et al. Strategies for PM_{2.5} in Guangdong Province to achieve the WHO-II air quality target from the perspective of synergistic control with CO₂[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, 34(9):2105-2112.
- [14] 曾巧楠.不同绿化类型对住宅小区夏季温湿度环境影响研究[D]. 杭州:浙江农林大学, 2016.
ZENG Qiaonan. Study on the effect of different greening types on the temperature and humidity environment of community in summer[D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2016.
- [15] 朱宁.基于微气候环境改善的寒冷地区建筑周边绿化研究[D]. 北京:北京建筑大学, 2020.
- ZHU Ning. The research on the greening around buildings in cold climate city based on microclimate environment improvement[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2020.
- [16] FEDERER C A. Trees modify the urban microclimate[J]. *Arboriculture Journal*, 1976, 2:121~127.
- [17] PANDIT R, LABAND D N. Energy savings from tree shade[J]. *Ecological Economics*, 2010, 69(6):1324-1329.
- [18] AKBARI H. Shade trees reduce building energy use and CO₂ emissions from power plants[J]. *Environmental Pollution*, 2002, 116(2):119-126.
- [19] 刘随心,曹军骥,安芷生.西安大气细粒子(PM_{2.5})质量浓度变化特征及其影响因素[J]. *过程工程学报*, 2009, 9(S2):231-236.
LIU Suixin, CAO Junji, AN Zhisheng. Characterization of ambient fine particles (PM_{2.5}) concentration and its influential factors in Xi'an[J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2009, 9(S2):231-236.
- [20] 张淑平,韩立建,周伟奇,等.冬季PM_{2.5}的气象影响因素解析[J]. *生态学报*, 2016, 36(24):7897-7907.
ZHANG Shuping, HAN Lijian, ZHOU Weiqi, et al. Relationships between fine particulate matter (PM_{2.5}) and meteorological factors in winter at typical Chinese cities[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(24):7897-7907.
- [21] 孟昭伟,张同军,雷佩玉,等.西安市PM_{2.5}浓度季节变化特征及气象影响因素解析[J]. *实用预防医学*, 2020, 27(8):934-937.
MENG Zhaowei, ZHANG Tongjun, LEI Peiyu, et al. Seasonal variation characteristics of PM_{2.5} concentration and the meteorological influencing factors thereof in Xi'an city[J]. *Practical Preventive Medicine*, 2020, 27(8):934-937.
- [22] ROSENFELD A H, AKBARI H, JOSEPH J R, et al. Cool communities: Strategies for heat island mitigation and smog reduction[J]. *Energy & Buildings*, 1998, 28(1):51-62.
- [23] 李小冬,朱辰.我国建筑碳排放核算及影响因素研究综述[J]. *安全与环境学报*, 2020, 20(1):317-327.
LI Xiaodong, ZHU Chen. Summary of research on account of carbon emission in building industry and analysis of its influential factor[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2020, 20(1):317-327.
- [24] 国家发展改革委办公厅.关于开展2014年度单位国内生产总值二氧化碳排放降低目标责任考核评估的通知-发改办气候[2015]958号[EB/OL]. (2015-04-27). https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201504/t20150427_963810.html.

- The General Office of the National Development and Reform Commission. Carrying out assessment and assessment of responsibility for reducing Carbon dioxide Emissions per Unit of GDP in 2014 - Climate {2015} No. 958[EB/OL]. (2015-04-27). https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201504/t20150427_963810.html.
- [25] 张博通. 关中地区城市常见行道树生态效益定量分析研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2020.
- ZHANG Botong. Quantitative analysis of ecological benefits on common street trees in the Guanzhong Area [D]. Yangling: Northwest A&F University,2020.
- [26] 董延梅. 杭州花港观鱼公园 57 种园林树木固碳效益测算及应用研究[D]. 杭州:浙江农林大学. 2013.
- DONG Yanmei. Research on the measure of carbon fixation benefit and appliance of 57 garden specises in Hangzhou Huagangguanyu Park[D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University,2013.
- [27] 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.
- XIONG Xiangyan, HAN Yongwei, GAO Xinting, et al. Analysis of carbon fixation and oxygen release capabilities of 17 afforestation plants in rural-urban fringe in Beijing[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2014,4(3):248-255.
- [28] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市居住区规划设计标准:GB50180-2018[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2018.
- MOHURD. Standard for urban residential area planning and design: GB50180-2018[S]. Beijing:China Architecture Publishing & Media Co. Ltd. , 2018.
- [29] 陈自新,苏雪痕,刘少宗,等. 北京城市园林绿化生态效益的研究(5)[J]. 中国园林,1998,(5):57-60.
- CHEN Zixin, SU Xuehen, LIU Shaozong, et al. Ecological benefit of gardens' afforestation in Beijing(5) [J]. Chinese Landscape Architecture, 1998, (5): 57-60.

(编辑 吴海西 沈 波)

(上接第 430 页)

- [6] 史帆,赵景波. 1960—2013 年陕南地区极端气温指数变化研究[J]. 江西农业学报, 2016,28(7):96-104.
- SHI Fan, ZHAO Jingbo. Research on changes in extreme air temperature indexes of southern Shaanxi region during 1960-2013[J]. Acta Agriculture Jiangxi, 2016,28(7):96-104.
- [7] 齐贵增,白红英,孟清,等. 1959—2018 年秦岭南北春季气候时空变化特征[J]. 干旱区地理, 2019(5): 1079-1091.
- QI Guizeng, BAI Hongying, MENG Qing, et al. Climate change in the Qinling mountains in Spring during 1959 to 2018 [J]. Arid Zone Research, 2019(5): 1079-1091.
- [8] 王劲峰,徐成东. 地理探测器:原理与展望[J]. 地理学报, 2017,72(1):116-134.
- WANG Jinfeng, XU Chengdong. Geodetector: Principle and prospective[J]. ACTA Geographica SINICA, 2017,72(1):116-134.
- [9] 陕西省地方志编纂委员会. 陕西省志·地理志[M]. 西安:陕西人民出版社,2000.
- Local Chronicle Compilation Committee of Shaanxi Province, Records and Geography of Shaanxi province [M]. Xi'an: Shaanxi People's Press,2000.
- [10] 姜创业,魏娜,程肖侠,等. 1961—2008 年陕西省年际气温和降水区域性变化特征分析[J]. 水土保持研究, 2011,18(1):197-200.
- JIANG Chuangye, WEI Na, CHENG Xiaoxia, et al. Analysis of inter-annual temperature and precipitation regional change during 1961—2008 in Shaanxi province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011, 18(1):197-200.
- [11] 冯晓刚,周在辉,李凤霞,等. 西咸一体化驱动的咸阳市热力景观格局时空分异分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2021,53(3):413-419.
- FENG Xiaogang, ZHOU Zaihui, LI Fengxia, et al. Spatiotemporal differentiation of thermal landscape pattern in Xiyang city driven by integration of Xi'an and Xianyang[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. and Tech. (Natural Science Edition), 2021,53(3):413-419.

(编辑 吴海西 沈 波)