

The Research on Campus Space Optimization of Low Carbon Based on CO₂ Diffusion Simulation

Yong Shi, Shilei Fu*, Jia Guo

Shenyang Jianzhu University, Shenyang Liaoning
Email: *951992051@qq.com

Received: Nov. 9th, 2015; accepted: Nov. 23rd, 2015; published: Nov. 26th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

On the premise of keeping total green areas to improve plant carbon sequestration ability, the model of optimizing the layout of the campus green space was put forward. This article focused on Shenyang Architecture University campus, and discussed urban green space layout based on the relationship between the green carbon sequestration function and CO₂ spatial distribution. At the same time, we obtained CO₂ space distribution pattern through CFD simulation technology, and revealed that plant carbon sequestration effect was the best boundary by using of CO₂ space data with green carbon sequestration function. The paper raised the mode of campus green space layout, optimized the campus green space layout, and made the campus green space in the limited area under playing the biggest ecological effect. The result is of great significance for the city, a broader range of green space layout pattern choice, response to global climate change and greenhouse gas emissions, and promotion of the urban space environment quality.

Keywords

Carbon Source, CFD Simulation, Check, Optimization Strategy

基于CO₂扩散模拟的校园空间低碳优化研究

时泳, 付士磊*, 郭佳

沈阳建筑大学, 辽宁 沈阳

*通讯作者。

Email: *951992051@qq.com

收稿日期: 2015年11月9日; 录用日期: 2015年11月23日; 发布日期: 2015年11月26日

摘 要

在保持绿地面积总量的前提下提高植物固碳能力, 并以此提出优化校园绿地空间的布局模式。本文以沈阳建筑大学校园为依托, 开展了基于绿地固碳功能与CO₂空间分布相耦合的城市绿地空间布局研究, 通过CFD模拟技术获取校园CO₂空间分布格局, 利用CO₂空间数据耦合绿地固碳功能, 揭示植物固碳效应最佳边界。最终提出了校园绿地空间布局模式, 优化了校园绿地空间布局, 使校园绿地在有限的面积下发挥了最大的生态效应。研究结果为城市以及更大范围内的绿地空间布局模式的选择, 应对全球气候变化和温室气体减排, 以及提升城市空间环境质量方面具有重要意义。

关键词

碳源, CFD模拟, 校验, 优化策略

1. 引言

2015年科学家首次在野外证实二氧化碳导致温室效应[1], 城市CO₂排放的快速增长成为全球温室气体排放上升的重要原因, 城市绿地系统在应对全球气候变化和温室气体减排方面发挥着重要作用[2]。传统的研究理论认为固碳途径主要为增加绿地面积、提高固碳质量, 然而有限的土地不可能无限增加绿地的供给[3]。如何在保持绿地面积的前提下提高植物固碳能力成为亟待解决的科学问题。实验表明CO₂浓度的增高能提升植物的固碳能力[4], 同时, CO₂与大气污染物的空间分布密切相关[5]。通过模拟CO₂浓度空间分布来指导绿地的空间格局不仅能充分发挥植物的固碳效应, 同时也可以有效消减大气污染物, 改善空气质量。如何实现城市绿地空间布局与CO₂浓度分布的耦合, 充分发挥绿地生态效益成为低碳规划的核心问题。

2. 校园碳排放源界定与量化

2.1. 校园碳排放源的界定

碳排放源, 顾名思义就是释放碳的源, 碳源一般以碳化物的形式向外释碳, CO₂是主要的碳化物[6]。本文研究校园范围内的碳排放源主要为生活和交通释碳量, 人呼吸所释放的CO₂是主要的生活碳源, 校园机动车则是主要的交通碳源, 餐饮燃烧所释放的CO₂也是校园的碳排放源之一。

2.2. 校园碳源的量化测定

本文以沈阳建筑大学校园空间为研究对象, 对沈阳建筑大学的碳足迹计算采用碳足迹计算器方法[7], 通过碳足迹计算器计算个人生活和生产中消耗能源产生的CO₂排放量, 利用经验公式将电、石油、煤碳、天然气等消耗量转化为CO₂的排放量, 或依据交通类型和运输距离来计算相应的CO₂排放量。

经测算一个成年人每天需要吸进氧气0.75 kg, 呼出二氧化碳0.90 kg [8]。统计得出校园全天活动人数为13,000人, 校园全天中因人员活动产生的CO₂质量为11,700 kg, 具体排碳量分布如图1所示。

本文对于车辆排放尾气中的CO₂采用百分比估算法[9], 经统计平均一天内进出校园的总车次数为1624, 再统计出平均全天通往各个方向车辆的类型、距离以及数量比, 再根据表1和表2即可得出车辆

全天排放 CO₂ 质量为 1745.053 kg。

餐饮燃烧天然气产生的 CO₂ 量所占的碳源比重较小，通过调查得出校园每天各餐饮单位用气量结合液化气 CO₂ 排放系数，可得出餐饮排放的天然气产生的 CO₂ 为 532.72 kg (表 3)。

综上可知，人活动产生的碳量占校园总碳量的 84%，交通产生的碳量占校园总碳量的 12%，餐饮排放的 CO₂ 量较少，仅占 4%，而人为活动主要集中于校园建筑内，碳汇应针对建筑碳源发挥固碳功能。

3. 校园 CO₂ 扩散模拟与实测

3.1. CO₂ 扩散模拟

计算流体力学(Computational Fluid Dynamics 简称 CFD)是一种用于分析流体流动性质的计算技术，

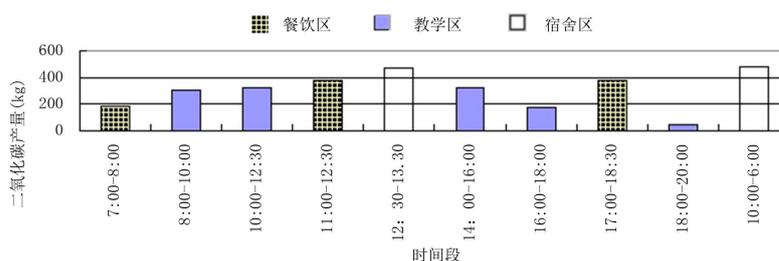


Figure 1. Campus carbon dioxide emissions (staff activity) profiles at different times
图 1. 校园二氧化碳排放量(人员活动)不同时间分布图

Table 1. All kinds of vehicle emissions coefficient

表 1. 各种车辆碳排放系数

车辆类型	大型车(A)	中型车(B)	校车(C)	轿车(D)
碳排放系数(kg/100 km)	78	20.23	40.8	22.14 (取中间值)

Table 2. Number of parking statistics for each parking

表 2. 各停车场停车数目统计表

停车场	1	2	3	4	5	6	7
车辆数 A:B:C:D	0:3:64:2	0:4:78:0	3:3:25:2	0:3:38:0	0:0:16:0	2:2:96:0	0:1:32:0
车次百分比(%)	18.3	22.3	7.2	10.9	4.6	27.5	9.2
行驶里程(km)	0.69	0.36	0.2	0.31	0.69	0.67	0.74
CO ₂ 排量(kg)	410.124	260.749	46.771	104.75	103.091	598.444	221.124

Table 3. Each cafeteria tables using natural gas

表 3. 各餐饮单位用气统计表

项目	使用数量	产生 CO ₂ 总量
一食堂	350 m ³	251.09 kg
二食堂	210 m ³	150.65 kg
三食堂	70 m ³	50.21 kg
四食堂	70 m ³	50.21 kg
商业街	45 m ³	30.56 kg
总量	745 m ³	532.72 kg

包括对各种类型的流体在各种速度范围内的复杂流动在计算机上进行数值模拟计算。运用 CFD 技术对一定空间中的气流建立流体的湍流模型,再根据提供的合理的边界条件和参数,可以对该空间内的流体流动形成的温度场、速度场和浓度场进行仿真模拟,并直观的显示其设计结果[10]。

研究中对城市模型的建立采用 AUTOCAD 软件进行绘制。在 FLUENT 软件精度范围内建立精度合理的物理模型对数值模拟的准确具有前提作用。流体力学计算机模拟的前处理过程包括对建筑三维模型的简化过程、数字建模过程、划分边界条件以及模型的计算模拟。

简化过程:针对校园内绿地的固碳浓度分析进行模拟中一方面要考虑建筑、绿地及周边空间对环境中心热环境、风环境等微环境的影响,并对影响空气中 CO₂ 浓度分布模拟结果的空间进行划分。因此对数字模型的建立需要对模型的空间结构及周围环境的空间结构进行精确划分,并保证模拟的真实且有意义;另一方面因为计算机软件 and 硬件所限模型并不能绝对建立精准,需有合适的运算的限制,因为结构复杂的空间结构在计算机软件中完全复原并不现实,但网格尺寸划分失真也将无法进行进一步的运算。因此在利用 FLUENT 软件运算之前,应对研究范围进行研究,对模型简化整合。首先将建筑细部进行简化,将建筑形体简化为规则形体。同时对建筑、道路、绿地水系等边界进行相应的简化处理。

数字建模:按照步骤导入各种基础资料和地理信息即可建出相应的数字模型。建筑模型则是根据实际的 CAD 施工图确定模型的实际比例与尺寸,导入前处理 ICEM-CFD 软件进行建模。

边界条件:计算域的划分是进行 CO₂ 模拟的关键环节,为保证来流的充分发展,计算域应该足够的大,应对几何模型相应适当的选择进风口和出风口的位置,用于对城市风环境下大气季风的模拟。沈阳市南部全年盛行风偏南风,其中西南和南风出现频率共占 23%,风速为 3~4 m/s。市内多年平均风速为 3.1 m/s。本文模拟风速为植物生长季平均风速,选择边界风速为 3.0 m/s 的西南风。

网格划分:CFD 软件计算的首要步骤就是进行数字模型的网格计算划分,网格代表了计算的精度大小,其网格划分的精度越精密,计算相对越准确。因此网格划分需要选择其适合的精度。本文的研究对象由于模型仿真度较高,模型较为复杂,因此,本研究采用非结构化网格划分(图 2) [11]。

3.2. 校园 CO₂ 分布实测

本研究中,沈阳建筑大学校园空间 CO₂ 浓度的数据均为自行监测获得。监测仪器包括台湾衡欣手持式 CO₂ 测试仪(含温度)、风速仪,采用十字样带法进行定距抽样实测(图 3)。

4. CO₂ 动态扩散模拟结果与校验分析

4.1. CO₂ 三维空间扩散模拟结果分析

CFD 软件可以准确迅速地对研究对象进行碳环境动态模拟,模拟结果需要多次反复调整校正以达到理想状态,模拟结果可对模型的任意高度和位置进行水平和垂直两个剖面的截取,得出 CO₂ 空间分布浓度,为优化策略提供可靠的依据。

4.1.1. 水平方向的 CO₂ 扩散浓度场分析

在贴近地表处模拟计算显示出的云图(图 4、图 5)来看,校园内释放的 CO₂ 在风环境影响下空间格局扩散分布与静态分布有所不同。从校园 CO₂ 分布情况来看,在校园主导风的影响下,校园下风向空间的 CO₂ 聚集浓度较高,在校园上风向空间的 CO₂ 浓度较低,其余校园空间内 CO₂ 分布略有差异。研究结果表明,校园内释放出的 CO₂ 沿主导风向进行扩散,CO₂ 浓度较低的区域多为上风向的开敞空间。教学区建筑群由于底部架空,对风的阻碍较小,风速较快,其 CO₂ 扩散的效果要好于底部架空较少或则封闭围合的建筑群体。

对比有风和无风时的模拟结果(图 6、图 7)可知, CO₂ 在气流的主导风向上进行扩散, 当无风时, CO₂ 扩散 5 米左右时, 扩散值基本接近于室外空间浓度值; 当有风时, CO₂ 扩散 1 米左右, 其浓度值基本接近于室外空间浓度值。

4.1.2. 垂直方向的 CO₂ 扩散浓度场分析

依据 Y 轴的剖面模拟结果(图 8)可以得出 CO₂ 垂直方向的分布特点: 首先, 总碳排放空间格局总体趋势上看, CO₂ 占空气体积比较大区域为整个校园下风向方向; 其次在垂直方向, 建筑迎风面与背风面的 CO₂ 扩散区域相比, 由于风绕过建筑时, 会在其屋顶发生湍流, 背风区会形成较大的涡流区, 背风生活区所释放的 CO₂ 受涡流影响, 会形成局部聚集, CO₂ 难以扩散; 同时迎风面由于对风的阻碍产生的回流也会对 CO₂ 扩散产生阻碍, 该处 CO₂ 浓度高于周边区域; 依据 X 轴的剖面模拟结果(图 9)可以明显看

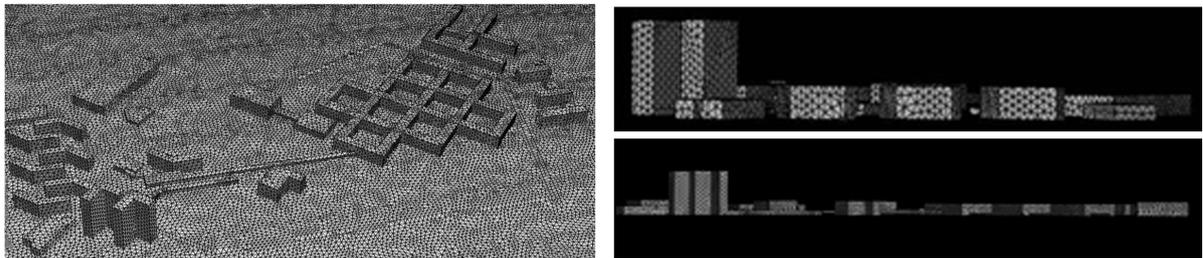


Figure 2. Process of meshing
图 2. 网格划分过程

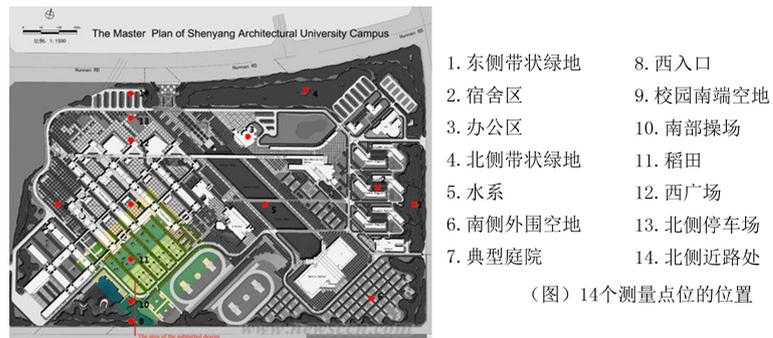


Figure 3. Campus CO₂ measurement points Shenyang Jianzhu University
图 3. 沈阳建筑大学校园 CO₂ 测量点

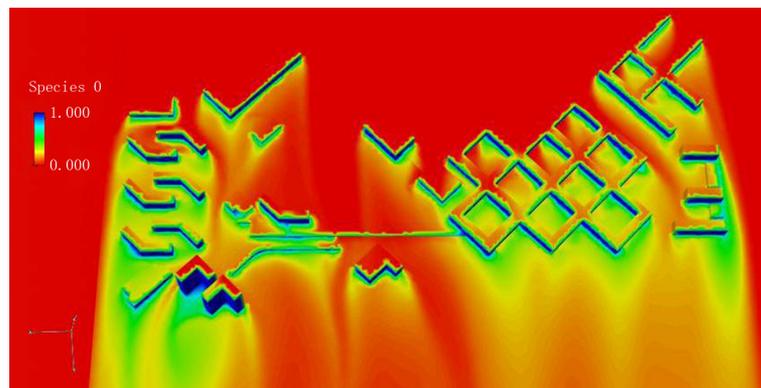


Figure 4. CO₂ concentration contours
图 4. CO₂ 浓度分布云图

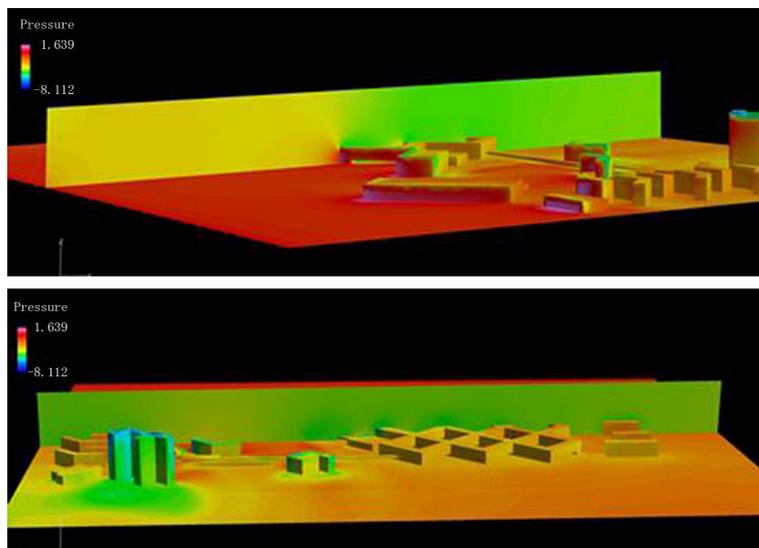


Figure 5. Pressure axonometric drawing

图 5. 压力轴测图

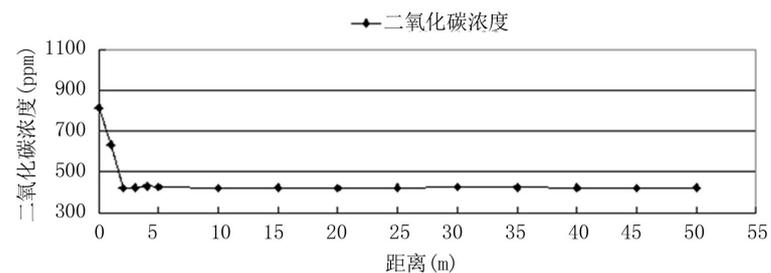


Figure 6. Concentration of CO₂ horizontal diffusion without wind simulation results

图 6. 无风情况下 CO₂ 水平扩散浓度模拟结果

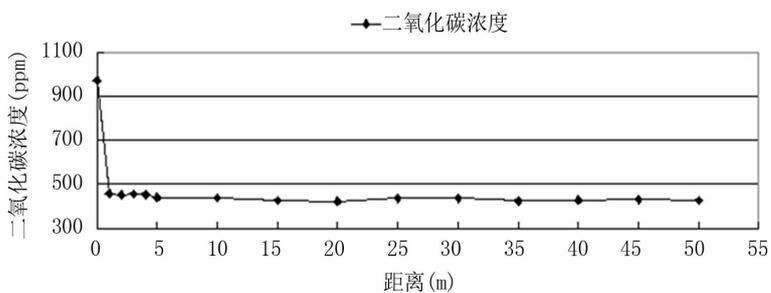


Figure 7. Windy conditions CO₂ horizontal diffusion concentration simulation results

图 7. 有风情况下 CO₂ 水平扩散浓度模拟结果

出：在后排建筑不受前排建筑风影区影响的情况下，沿主导风向前高后低的建筑组合方式的 CO₂ 扩散效果明显好于相同高度建筑组合方式的扩散效果。

建筑对 CO₂ 的扩散在垂直方向上主要影响为建筑高度覆盖层以下，但在建筑高度 2 m 以下 CO₂ 垂直分布差异不显著；在建筑高度 2 m 以上 CO₂ 浓度迅速衰减，超过建筑物高度时，垂直分布的影响效应几近消失。在校园空间 CO₂ 竖向分布模拟中，无论有风和无风条件下，CO₂ 的垂直浓度分布受空间高度变

化的影响不大。

4.2. CO₂ 实测校验

本研究中,通过对 CFD 软件模拟 CO₂ 扩散结果进行实际测量进行验证。验证数据主要采用多点多时段监测数据,数据验证点主要分布校园内部各个典型区域,共选取 14 个监测点对模型模拟的结果进行验证。CO₂ 实测结果表明二者数据具有可比性,CFD 用于模拟 CO₂ 扩散效应的研究是可行的。验证结果如图 10 所示。

差异性显著分析结果(表 4)表明,CFD 软件模拟 CO₂ 浓度分布结果与实测值差异不显著($P > 0.05$),满足校园空间模型模拟的精度,CFD 模型对 CO₂ 扩散效应场的模拟是有效和可行的。

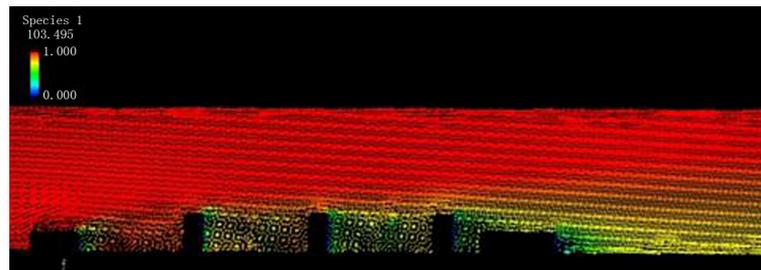


Figure 8. CO₂ diffusion Y cross-sectional view
图 8. CO₂ 扩散 Y 剖面图

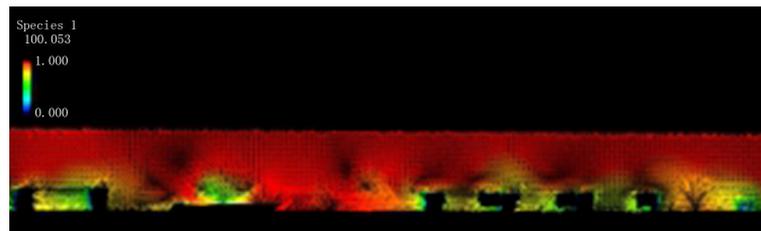


Figure 9. CO₂ diffusion X cross-sectional view
图 9. CO₂ 扩散 X 剖面图

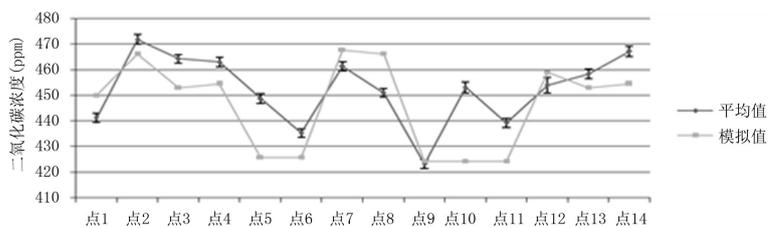


Figure 10. The contrast trend between numerical CO₂ simulation and the field measurement
图 10. CO₂ 浓度模拟值与实测值之间的对比趋势图

Table 4. Single factor analysis of variance
表 4. 单因子方差分析

差异源	SS	df	MS	F	P-value	F crit
组间	245.9764	1	245.9764	1.005682	0.325182	4.225201
组内	6359.257	26	244.5868			
总计	6605.233	27				

5. 结论与策略

5.1. 结论

低碳是一种理念，相对于欧洲美国等发达国家各高校提出的一系列低碳校园的全面系统的具体政策与实施措施，中国的高校还处于起步阶段。高校是可持续校园发展的重要特殊的社区单元，在 CO₂ 减排的研究和行动方面都应该做出表率。针对低碳校园建设提出科学研究有利于指导各高校的可持续校园评价、规划和建设活动[12]。

本文以沈阳建筑大学校园空间为研究对象，通过对校园空间 CO₂ 浓度的测量，以及校园碳源的测量，辅助计算机 CFD 软件对风环境进行模拟，进行风环境下 CO₂ 的空间分布的模拟来评价现状校园空间布局下的碳环境状况，进而提出初步优化方案，以改善整个校园空间环境，使其具有最佳的固碳效应，以提高校园环境空气质量。本研究方法也可用于研究 SO₂、PM 2.5 等污染性气体在空间的分布状况，以改善城市大气环境质量。

5.2. 校园空间低碳建设优化策略

5.2.1. 校园碳源减排

在碳足迹计算中煤炭、石油、天然气是主要能源，在中国煤炭作为一种低效不可再生能源，其利用效率不足 30%，并且燃烧排放大量的 CO₂。电力和煤炭所用的化石能源产生的 CO₂ 量占最大部分，其中包括建筑供电和取暖，包括对教学区、图书馆、学生宿舍、办公楼的供电、取暖以及夏季空调制冷[13]。可见如何降低学校的能源消耗是沈阳建筑大学校园低碳发展的关键。

交通量造成的 CO₂ 排放量约占整个校园碳排放量的 30%，其中私家车出行占了绝大部分，而班车和公共交通的比例则较小。这对交通碳足迹消减方案提供了有力支持——即减少私家车出行，鼓励公共交通是消减碳足迹的有效途径。

一个重要的碳源是日常食物、生活品以及消耗品的采购。在沈阳建筑大学校园碳足迹研究中发现日常生活的生态足迹所占比例较小，因为校园的生产活动较少，故日常生活人均碳足迹较小。

针对减少整个校园碳足迹提出如下策略：

1) 在减少能源使用产生碳排放方面，制定配套设施的能源管理计划，投资可持续发展方案，制定奖励制度；用可再生能源代替化石燃料能源的使用，对建筑能源使用进行可视化和跟踪监测评估；保证适宜性前提下，优化楼宇自动化和控制的能源效率系统，热回收系统，以及照明系统，对建筑物采用绿色节能建设标准，最大程度上减少不可再生能源的使用[14]。

2) 交通和通勤形成的碳足迹是除能源使用外占校园碳足迹比重最大的一部分，减少校园交通和通勤减少碳排放可以采用以下措施：采用清洁能源作为汽车燃料，减少人的交通通行产生的碳足迹，如减少商务旅行改为视频会议；确保高校校园规划结构紧凑，功能混合完善，建设成为适合步行的空间。

3) 减少材料和废物产生碳足迹方面，减少纸张的使用，实施文件管理无纸化操作，要求所有供应商使用可重复使用或可回收的包装等措施。

4) 降低“高投入”（能源和温室气体密集）食品的需求，使用生命周期分析(LCA)方法，制定可持续的粮食采购政策，建立可持续食品体系；增加当地粮食采购，鼓励校园内粮食蔬菜食物种植；激励消费者购买健康，低碳的食物等措施可以作为减少食物产生的碳足迹可行的策略[15]。

5.2.2. 建筑群体布局形式

建筑群体规划布局与气候条件关系密切，建筑布置时应考虑建筑密度、高度对微环境下 CO₂ 扩散的影响。在校园建筑群体建设上应选择有利于气体流通的建筑围合形式[16]。

为了改善整体教学区内部空间的碳环境,使 CO_2 扩散分布更均匀,改善目前围合建筑群体内部的 CO_2 空间分布,需对建筑底部架空的形式进行调整,改变底部架空的位置和大小,使围合建筑内部空间的气体流通路径更长,使 CO_2 分布更均匀,并增加楼体迎背风面的压差,使房间具有更好的通风效果。增加前排建筑高度,增强建筑物下洗作用,使植被吸收的 CO_2 迅速脱离地面,在底部形成低浓度区域(图 11)。

在架空区域可以增加一些辅助设施,改变 CO_2 的空间分布,减少冲旋涡风对 CO_2 扩散的影响,使底部空间气流更加稳定,进而改善围合建筑群体内部空间的风碳环境,如可以转动调节方向的转板,在架空区上方设置顶棚或出挑平台。

5.2.3. 绿地空间布局

通过计算机 Fluent 计算模拟得出结论,在教学区建筑群体中建筑围合架空且平行于主导风向,风速较快时,流通性较好, CO_2 在风的作用下被迅速带走, CO_2 浓度较高的区域集中在建筑群体附近乔木带,而中间的活动区域碳浓度较低;当 CO_2 扩散到其他空间时,由于受建筑阻碍的影响,改变风的流动状态,在围合建筑群体内部形成聚集,致使庭院内部空间的 CO_2 浓度较高,碳环境较差。在 CO_2 垂直方向,建筑迎风面与背风面的 CO_2 扩散区域相比,由于风绕过建筑运时,会在其屋顶发生分离,背风区会形成较大的涡流区域,背风生活区所释放的 CO_2 受涡流影响,会形成局部聚集, CO_2 扩散效果不好;同时迎风面由于对风的阻碍产生的回流对 CO_2 扩散也产生了阻碍,周边区域 CO_2 浓度较低(图 4);

碳平衡是碳源和碳汇 CO_2 量的平衡状态。结合校园功能分区和用地现状,应对相应的对绿地空间分布进行调整。首先出于满足碳平衡的前提,通过碳源碳排放计算及模拟以及对碳汇固碳量的比较和计算,比较得出碳排放量是高于碳汇固碳量的空间,并在此区域增加碳汇值[17]。其次,基于碳汇固碳效应,供学生学习、讨论、休憩、娱乐健身等活动的主要活动区域,绿地布局应保证场地规整,满足在举办活动期间场地的使用,并避免植被产生破坏。同时应在校园通风性较好的区域布置绿地,使空间的可以充分地固定空气中的 CO_2 ,以达到低碳目的。

基于模拟分析结果校园绿地的布局应遵循以下布局原则:

1) 校园绿地布局应考虑布置在主导风向的下风向,且绿地布局应考虑周围空间尽可能开敞,结合建筑群体内主导风的主要流动路径布置相应形式的校园绿地。对于各种覆盖类型的校园绿地,应遵循前低后高的绿地分布原则并降低绿地间相互的影响。

2) 在校园下风向位置布置的绿地应尽量采用分散的布置形式,除保证下风向空气畅通,还可以避免因绿地对气流产生阻碍而产生的回流或涡流现象。而受到建筑群体阻碍形成的的回流现象应沿建筑迎风面的前方布置周边式带状绿地,以减少回流对固碳效应的影响。建筑背风区的气体 CO_2 由于受到涡流区的影响扩散效果较差,考虑到冬季防风滞尘等因素在绿地布局时应增加建筑与绿地间距离以减少风环境的影响。

3) 绿地布局上应考虑使用功能和绿地形式设计相结合,根据具体空间使用的需求选择带状、中心式以及分散式绿地形式进行布局。

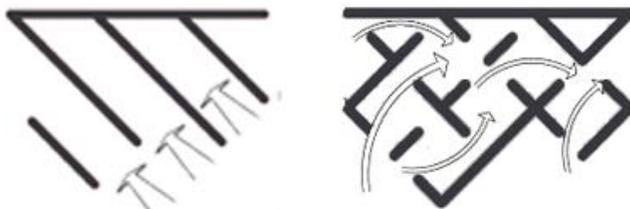


Figure 11. Comparison of bottom overhead program
图 11. 教学区建筑群体底部架空方案对比

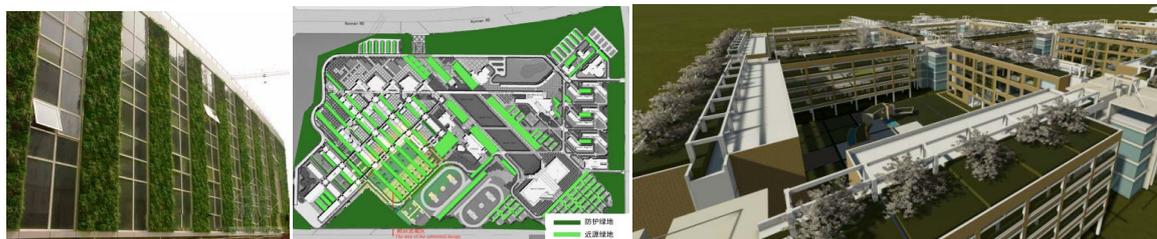


Figure 12. Building green signal in three dimensional space

图 12. 建筑三维空间绿化示意

4) 为了形成良好的校园三维空间的碳浓度, 窗台、阳台、露台、建筑立面、屋顶绿化都是垂直绿化需要考虑的重要内容, 在有限空间当中提高绿化种植面积(图 12)。

基金项目

本文由国家自然科学基金“基于动态释氧效应场的城市绿地空间布局研究(51178274)”和十二五国家科技支撑计划“典型城镇群空间规划与动态监测技术集成与示范(2012BAJ15B06)”等项目资助。

参考文献 (References)

- [1] Feldman, D.R., Collins, W.D., Gero, P.J., Torn, M.S., Mlawer, E.J. and Shippert, T.R. (2015) Observational Determination of Surface Radiative Forcing by CO₂ from 2000 to 2010. *Nature*, **519**, 339-343. <http://dx.doi.org/10.1038/nature14240>
- [2] 朱鹏, 姚亦锋, 张培刚. 城市绿地系统景观生态规划探讨[J]. 城市环境与城市生态, 2006, 19(1): 17-19.
- [3] 刘滨谊, 姜允芳. 论中国城市绿地系统规划的误区与对策[J]. 城市规划, 2002, 26(2): 76-80.
- [4] 付士磊, 等. CO₂ 浓度升高对沈阳市银杏生长及光合固碳能力的影响[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2006, 25: 269-271.
- [5] 武鸣, 范秋云. 长沙城区大气中二氧化碳浓度变化及与其它污染物相关性分析[J]. 四川环境, 2013, 36(6): 39-43.
- [6] 义白璐, 韩骥, 等. 区域碳源碳汇的时空格局——以长三角地区为例[J]. 应用生态学报, 2015, 26(4): 973-976.
- [7] 王晓琳, 姬长生, 张振芳, 周爽. 基于碳足迹的煤炭矿区碳排放源构成分析[J]. 煤矿安全, 2012, 4(59): 169-170.
- [8] 杨士弘. 城市绿化树木碳氧平衡效应研究[J]. 城市环境与城市生态, 1996, 9(1): 37-39.
- [9] 肖海文, 柳登发, 张盛莉, 翟俊. 人工湿地处理雨水径流的设计方法和实例[J]. 中国给水排水, 2013, 29(8): 37-41.
- [10] Mochida, A. and Lun, I.Y.F. (2008) Prediction of Wind Environment and Thermal Comfort at Pedestrian Level in Urban Area. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **96**, 1498-1527.
- [11] 李鹏. 基于遥感与 CFD 仿真的城市热环境研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2008, 53-55.
- [12] 孙丽霞. 谈高校低碳校园建设的内涵及其路径[J]. 商业经济, 2011, 11(22): 15-21.
- [13] Mensink, C. and Cosemans, G. (2008) From Traffic Flow Simulations to Pollutant Concentrations in Street Canyons and Backyards. *Environmental Modelling and Software*, **23**, 288-295.
- [14] 高畅, 石铁矛, 刘大鹏, 周媛, 郗凤明. 沈阳市绿地生态信息获取与数据库建设研究[J]. 湖南农业科学, 2011, 9(17): 143-146.
- [15] Lam, K.M. and To, A.P. (2006) Reliability of Numerical Computation of Pedestrian-Level Wind Environment around a Row of Tall Buildings. *Wind and Structures*, **8**, 473-492. <http://dx.doi.org/10.12989/was.2006.9.6.473>
- [16] 张虎. 从自然通风角度论合肥地区住宅建筑群体布局[J]. 安徽建筑工业学院学报(自然科学版), 1996, 4(2): 38-42.
- [17] 张彬彬, 史英杰, 解瑞升. 浅议沈阳建筑大学校园生态的得与失[C]. 多元与包容——中国城市规划年会论文集: 2012 年卷. 昆明: 云南科学技术出版社, 2012: 20-22.