

DOI: 10.20103/j.stxb.202209252729

陈颖, 于森, 马嘉, 李运远. 典型浅街峡谷布局及其植物配置模式春季花粉飞散特征模拟研究. 生态学报, 2024, 44(1): 256-270.

Chen Y, Yu M, Ma J, Li Y Y. Simulation study on the characteristics of spring pollen scattering in typical shallow street canyon layout and plant configuration mode. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(1): 256-270.

典型浅街峡谷布局及其植物配置模式春季花粉飞散特征模拟研究

陈 颖, 于 森, 马 嘉*, 李运远

北京林业大学园林学院, 北京 100083

摘要:城市中的气传花粉已成为春秋季节性过敏的主要过敏原之一, 研究典型建筑布局及其植物配置模式下花粉飞散特征能够为合理优化城市绿地配置提供数据支撑, 为花粉飞散研究提供补充。基于北京市海淀区校园绿地春季观测数据, 提取 3 个采样地街谷布局和植物特征参数, 借助 CFD 平台构建 15 个典型浅街峡谷布局及其植物配置模式参数化场景, 探究不同场景下花粉飞散特征和距离阈值。研究结果表明: ①花粉高浓度区位于风速较低、空气流动性较差的区域, 花粉低浓度区位于风速高、空气流动性较好的地方。②4 种植物配置模式的花粉飞散特征表现为行道树式>散点式>行道树+组团种植>组团式, 花粉沉降特征表现为组团式>行道树+组团种植>行道树式>散点式。错列式布局结合行道树式植物配置花粉浓度降低率最高为 24.89%, 飞散效果相对更好。围合式布局结合组团式植物配置花粉浓度降低率最低为 7.31%, 聚积效果相对较好。③受不同建筑、植物和风场的影响, 3 类建筑布局花粉飞散距离远近依次为行列式>围合式>错列式, 行列式需要约 35—75m 的飞散距离, 围合式需要约 28—60m 的飞散距离, 错列式需要约 20—53m 的飞散距离。风速低且花粉浓度高、飞散距离近的植物配置模式易于聚积, 风速高且花粉浓度低、飞散距离远的植物配置模式易于飞散。

关键词:浅街峡谷; 植物配置; 花粉; 飞散特征; CFD 模拟

Simulation study on the characteristics of spring pollen scattering in typical shallow street canyon layout and plant configuration mode

CHEN Ying, YU Miao, MA Jia*, LI Yunyuan

School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: Airborne pollen in cities has become one of the main allergens of seasonal allergy in spring and autumn. Studying pollen dispersion characteristics under typical building layouts and their plant configuration patterns can provide data support for rational optimization of urban green space configuration and complement pollen dispersion studies. Based on the spring observation data of the campus green space in Haidian District, Beijing, the street valley layout and plant characteristics parameters of three sampling sites were extracted, and 15 parametric scenarios of typical shallow street valley layouts and their plant configuration patterns were constructed with the help of Computational Fluid Dynamics platform to explore the pollen dispersion characteristics and distance thresholds under different scenarios. The results show that: ① the area with high pollen concentration is located in the area with low wind speed and poor air mobility, and the area with low pollen concentration is located in the area with high wind speed and good air mobility. ② The pollen dispersion characteristics of four plant configuration patterns are shown as street tree type > scattered > street tree+group planting > grouped type, and the pollen deposition characteristics are shown as grouped type > street tree+group planting > street tree

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(52108037);北京市重点研发计划(D171100007117003)

收稿日期:2022-09-25; **网络出版日期:**2023-09-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: majiaaaa@bjfu.edu.cn

type > scattered. The highest pollen concentration reduction rate of 24.89% was achieved by staggered layout combined with street tree type planting configuration, and the dispersal effect was relatively better. The back-shaped layout combined with group planting configuration has the lowest pollen concentration reduction rate of 7.31%, and the aggregation effect is relatively better. ③ Influenced by different buildings, plants and wind field, the pollen dispersion distance of three types of building layout is in the order of rowed > back-shaped > staggered, rowed need about 35—75m dispersion distance, back-shaped need about 28—60m dispersion distance, staggered need about 20—53m dispersion distance. Plants with low wind speed, high pollen concentration and close dispersion distance are easy to accumulate, while plants with high wind speed, low pollen concentration and long dispersion distance are easy to disperse.

Key Words: shallow street canyon; plant configuration; pollen; scattering characteristics; CFD simulation

近年来,人们在享受城市绿化带来的生态福祉的同时,也开始关注植源性污染等问题^[1]。其中,气传花粉作为春季主要的过敏原,是导致过敏性鼻炎^[2]、过敏性结膜炎^[3]等季节性过敏症的主要原因之一。有调查显示患病群体遍布成年人和儿童,儿童患病率接近 40%,高峰期月均患病人数约上千人^[3]。同时,园林绿化植物进入生长成熟期,春季木本花粉浓度相比过去显著增加^[4-6]。加之城市建成区内部建筑密度高,建筑硬质界面围合形成的街道峡谷,构成光滑的城市下垫面,使花粉失去附着场所,加剧了花粉的飞散和飘荡^[7]。其中,居民区、单位、学校等人类活动集中的场所,建筑密度适中,植物配置丰富,在为人们提供了优美舒适工作生活环境的同时,也存在着致敏性花粉聚积的潜在风险^[8]。

目前,国内外对于气传花粉研究,多聚焦花粉致敏性^[9-10]、浓度变化^[11-13]、花粉与气象因子的关系^[14-19]、城市尺度下花粉时空分布特征^[20-24]等问题,周江鸿等人^[10]基于北京市 3 个城区花粉种类和浓度评估 8 类风媒花乔木的潜在花粉污染风险;齐晨等人^[12]通过分类花粉浓度数据和逐日气象观测数据建立北京地区主要气传致敏花粉年浓度峰值日期预测模型。虽已有部分研究探讨中微观尺度下,致敏植物的花粉散发、运输和飞散过程^[25-28],但多采用实测数据,受人力、时间、植被条件和气象因素等多方面实验设计的限制很难实现全方位连续监测^[29],难以完全揭示复杂现实情景中的花粉飞散特征。针对这一问题,本研究借鉴大气颗粒物飞散规律的研究方法^[29-37],采用数值模拟弥补二维实测模式的局限性,实现三维空间花粉飞散模拟及数据可视化,促进花粉参数化模拟的思路延伸。

因此,本研究以实测数据为基础,采用 CFD 参数化模型模拟的研究方法,解析 $H/W \leq 0.5$ 的典型浅街峡谷建筑布局及其植物配置方式对花粉飞散特征的影响,重点探讨不同建筑布局和植物配置模式下所形成的风场特征、花粉飞散特征以及花粉飞散距离阈值 3 个问题,研究结果将为未来季节性花粉症的预防和城市绿地优化提供参考。

1 研究样地与花粉监测

1.1 监测花粉选择与研究样地

北京地处暖温带,春季致敏树种主要以木犀科 (Oleaceae)、桑科 (Moraceae)、松科 (Pinaceae) 及柏科 (Cupressaceae) 为主,占全年花粉总量的 53%^[16],高峰期日花粉浓度超过 2500 粒/1000mm²^[2]。其中,洋白蜡 (美国红栎, *Fraxinus pennsylvanica*) 生长快、抗性强、材质好、繁殖容易,作为林业用材和防护树种从北美引入我国^[38]。其树形优美、枝叶观赏性强,作为行道树和庭荫树在北京地区广为使用^[39]。但是,因其花粉产量大,洋白蜡也是春季主要的致敏植物之一^[40]。因此,本文选取北京市内典型浅街峡谷 (简称“街谷”) 中,植物配置包含洋白蜡的 3 个研究样地,于春季进行为期 1 个月的花粉采集监测 (图 1、表 1)。

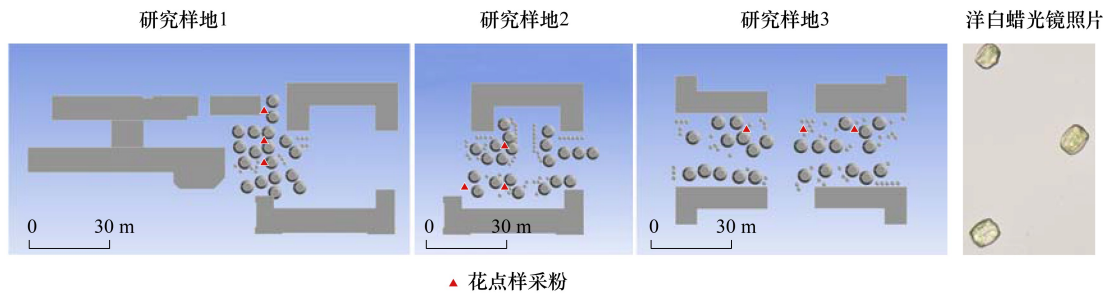


图 1 研究样地平面图

Fig.1 Plans of study sample site

表 1 浅街峡谷及样地植物群落基本信息

Table 1 Basic information of shallow street canyons and plant communities

研究样地		研究样地 1	研究样地 2	研究样地 3
Study sample sites		Study sample site 1	Study sample site 2	Study sample site 3
建筑密度 (BCR)		0.24	0.25	0.18
Building density				
容积率 (FAR)		1.43	1.01	0.89
Volume ratio				
空间开放度 (SO)		0.53	0.74	0.92
Spatial openness				
建筑平均高度 (ABH)/m		18.00	15.00	15.00
Average building height				
建筑平均体积 (MBV)/m ³		34769.17	24188.47	10896.41
Average building volume				
围合度 (DE)		1.57	1.09	1.06
Conformity				
建筑间距/m		37.00	37.00	39.00
Building spacing				
峡谷宽度/m		37.00	37.00	39.00
Street-canyon width				
群落结构		乔-灌-草	乔-灌-草	乔-灌-草
Community structure				
植物组成		洋白蜡+国槐-金银木-黑麦冬	洋白蜡+白皮松-湖北海棠-黑麦冬+玉簪	洋白蜡+美桐-白碧桃+铺地柏-玉簪
Plant composition				
植被特征	乔木	高度 10.80m; 冠幅 8.90m; 枝下高 3.00m	高度 11.30m; 冠幅 8.00m; 枝下高 4.45m	高度 9.50m; 冠幅 7.50m; 枝下高 3.25m
	灌木	高度 3.20m; 冠幅 2.00m; 枝下高 1.00m	高度 3.25m; 冠幅 2.00m; 枝下高 1.25m	高度 2.50m; 冠幅 2.00m; 枝下高 1.00m
群落郁闭度		80%	70%	80%
Community depression				

1.2 花粉浓度监测

研究选择 2021 年 4 月 10 日—2021 年 5 月 10 日期间,晴朗无雨的天气,开展 28d 的样地花粉浓度监测,采样时间 8:00—13:00,收集花粉浓度、温度、湿度、风速等数据。花粉采集方法采用叶氏重力沉降法,将花粉玻片放置在群落内的 Durham 花粉收集器中央暴露于空气中^[41],中央设置玻片 (CAT.NO.7105) 限位区,花粉收集器距离地面 1.2—1.5m。考虑到花粉检测的时效性等客观条件限制,实验选择在 3 个典型建筑街谷各设置 3 个采样点,多点同时检测,共收取曝片 336 片,检测出花粉 23 种。曝片取回后利用 0.1% 龙胆紫染色剂染色,制作花粉样品,利用 ex20 生物显微镜进行花粉种类识别和计数,将计数结果换算为日花粉浓度 (单位:粒/1000mm²)。此外,利用温湿度监测仪 LM-8000A 同步测定气象因子 (温度、湿度、风速),时间区间与花粉采样

时间相同,每小时测定 1 次,取当天算数平均值作为当日气象因子采集结果。

2 研究方法

2.1 CFD 模型构建

研究通过计算流体力学(Computational Fluid Dynamics,简称 CFD)模拟软件 ANSYS Fluent,构建样地风环境和花粉扩散模型^[42—43]。根据样地的实际建筑、植物群落测绘数值(表 1),运用 AutoCAD 软件构建 1:1 比例的浅街峡谷三维模型,在不影响模拟结果的前提下,保留建筑和植物的几何特征,简化不光滑外观。参考欧洲 COST 的最佳行动指南^[44—45]和日本建筑设计科学院^[46]研究成果,将模型计算域高度设定为最高建筑的 4 倍,计算域入流边界、出流边界及余下两侧至建筑群的距离设定为最高建筑的 5 倍(表 2)。

表 2 计算模型参数设置
Table 2 Calculation parameters and boundary condition settings

计算参数 Calculation parameters	参数计算公式 Parameter setting	参数意义 Parameter Meaning
湍动能 Turbulent kinetic energy	$k = \frac{3}{2} (u_{avg} I)^2$	k 为湍动能, u_{avg} 为平均速度, I 为湍流强度
湍动能耗散率 Turbulent dissipation rate	$\varepsilon = c_{\mu}^{\frac{3}{4}} \cdot \frac{k^{\frac{3}{2}}}{l}$	ε 为湍流耗散率, C_{μ} 为常数项系数 0.09, k 为湍动能, l 为湍流尺度

k :湍动能 Turbulent kinetic energy; u_{avg} :平均速度 Average speed; I :湍流强度 Turbulent intensity; ε :湍流耗散率 Turbulent dissipation rate; l :湍流长度尺度 Turbulent length scale

2.2 数值模拟有效性验证

构建 3 个研究样地的三维模型,进行实测值与模拟数值有效性验证。选取 2021 年 4 月 12 日—2021 年 4 月 18 日期间,连续 7 天无间断、无异常值的实测数据作为模拟验证的输入参数,花粉源数值为群落内部日花粉浓度,风速按照当日实测风速平均值输入。

将 CFD 模拟得出的风速和日花粉浓度以及相应实测数值作为变量,通过双变量相关分析判定相关系数。相关系数 r 计算公式为:

$$r = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{\sqrt{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \sqrt{n \sum y^2 - (\sum y)^2}} \quad (1)$$

式中, r 为相关系数; x 为实测日花粉浓度或风速; y 为模型模拟日花粉浓度或风速; n 为数据样本量。

2.3 典型建筑布局与植物配置场景设置

根据建筑信息模型分类和编码标准^[47]与实际形态观测,提取行列式(R)、围合式(B)、错列式(S)3 种典型浅街峡谷的建筑布局,每种建筑布局下设置行道树式(1)、散点式(2)、组团式(3)、行道树与组团式结合(4)4 种模式的植物配置。设定 4 个规格、位置固定的花粉源为每种建筑布局下的对照组(0)。根据实际观测及相关文献^[15,48],模拟输入风速值 3.0m/s,花粉浓度 500 粒/1000mm²,建筑高度统一为 15.00m,乔木规格统一为高 10.00m、冠幅 8.50m、枝下高 4.30m(表 3)。

3 结果

3.1 实测数据与 CFD 模拟验证结果

使用 CFD 模拟得出的 3 个研究样地连续 7 天的花粉浓度数值、样地实际测定的花粉浓度数值作为变量,进行相关性检验,判定 CFD 模拟表达花粉飞散情况的有效性。得到相关系数,样地 1 为 $r=0.729$,样地 2 为 $r=0.708$,样地 3 为 $r=0.661$,具有较强相关性,CFD 模拟所得数据在一定程度上可以反映 3 个样地的花粉飞散情况。

表 3 浅街峡谷典型建筑布局及植物配置建模参数

Table 3 Modeling parameters for typical building layout and plant configuration in Shallow Street Canyon

建筑布局 Architectural layout 植物配置模式 Plant configuration pattern	行列式 (R)					围合式 (B)					错列式 (S)				
	Rowed building layout					Back-shaped building layout					Straggered building layout				
	R0	R1	R2	R3	R4	B0	B1	B2	B3	B4	S0	S1	S2	S3	S4
街道峡谷宽度 Street canyon width/m			48.00					34.00					38.00		
街道峡谷高宽比 Street canyon height to width ratio			0.31					0.44					0.40		
进、出风口宽度 Air inlet and outlet width/m			48.00					34.00					38.00		
植物密度 Plant density	—	9.00	7.00	19.00	42.00	—	9.00	7.00	19.00	42.00	—	9.00	7.00	19.00	42.00

R0:行列式布局对照组 Row building layout control group;R1:行列式布局+行道树式配置 Rowed building layout+Street tree configuration;R2:行列式布局+散点式配置 Rowed building layout+Scattered configuration;R3:行列式布局+组团式配置 Rowed building layout+Grouped configuration;R4:行列式布局+行道树与组团式结合配置 Rowed building layout+Street trees combined with grouped configurations;B0:围合式布局对照组 Back-shaped building layout;B1:围合式布局+行道树式配置 Back-shaped building layout+Street tree configuration;B2:围合式布局+散点式配置 Back-shaped building layout+Scattered configuration;B3:围合式布局+组团式配置 Back-shaped building layout+Grouped configuration;B4:围合式布局+行道树与组团式结合配置 Back-shaped building layout+Street trees combined with grouped configurations;S0:错列式布局对照组 Straggered building layout;S1:错列式布局+行道树式配置 Straggered building layout+Street tree configuration;S2:错列式布局+散点式配置 Straggered building layout+Scattered configuration;S3:错列式布局+组团式配置 Straggered building layout+Grouped configuration;S4:错列式布局+行道树与组团式结合配置 Straggered building layout+Street trees combined with grouped configurations

3.2 典型浅街峡谷的风场特征

基于街谷建筑布局的风场模拟,输出 3 种建筑布局的风速云图(图 2)。风速初始值输入相同的情况下,3 种街谷布局风速整体呈现出中间高、两侧低的分布规律,其中行列式布局街谷中心风速最大,区间为 3.00—4.04m/s。街谷内部最低风速略有不同,行列式布局低风速区出现在建筑背风侧,区间为 0.32—1.30m/s;围合式布局低风速区出现在建筑“内凹”处和建筑背风侧,风速区间为 0.15—0.80m/s;错列式布局低风速区出现在建筑背风侧,区间为 0.10—1.20m/s。

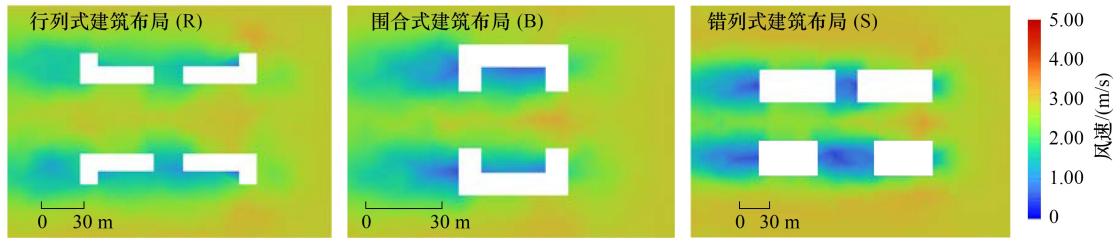


图 2 典型浅街峡谷建筑布局(x-y 截面) 风速云图

Fig.2 Typical shallow street canyon building layout (x-y section) wind speed cloud map

3.3 典型浅街峡谷及植物配置模式下的风场特征

为分析不同植物配置模式对街谷风环境的影响,参数化模拟 15 种不同植物配置模式下的街谷风场风速(图 3)。对比无植物配置场景下的街谷,增加植物配置可以有效降低街谷内的平均风速,风速降低率为围合式>错列式>行列式(表 4)。

增加植物配置的模拟场景下,其中围合式布局平均风速区间为 0.47—0.76m/s,相比无植物配置时降低 76.87%。由于该布局“回”字状的建筑排布方式,围合式布局街谷中央为低风速区,街谷出风口为高风速区。搭配 B3 组团式配置时,气流流经组团式内部逐渐衰减,平均风速降低最显著,降低率为 82.86%,平均风速 0.47m/s和最大风速 2.03m/s 均为 4 种植物配置模式中的最低值。搭配 B1 行道树式配置时,建筑与行道树形成的线性风廊利于提升街谷内风速,因此其平均风速降低最不显著,降低率为 72.29%,平均风速(0.76m/s)在

4 种模式最高。

增加植物配置的错列式布局平均风速区间为 0.65—0.85m/s,相比无植物配置时降低 71.78%。由于该布局前后交错的建筑排布方式,街谷进风口与街谷中央、下排建筑背风向均为低风速区,街谷出风口为高风速区。搭配 S4 行道树与组团式结合配置时,气流流经植物组团形成局部环流,部分气流滞留于组团内部,或被行道树阻滞,导致街谷内平均风速(0.71m/s)降低最显著,降低率为 73.60%。搭配 S1 行道树式配置时,行道树加强街谷线性风廊的通风效果,使得 S1 平均风速(0.85m/s)降低最不显著,降低率为 68.31%。

增加植物配置的行列式布局平均风速区间为 0.69—0.96m/s,相比无植物配置时降低 69.85%。受建筑行列排布影响,街谷进风口为低风速区,出风口为高风速区。与错列式布局类似,搭配 R4 行道树与组团式结合配置时,街谷内平均风速降低最显著,降低率为 73.56%,平均风速 0.73m/s 和最大风速 2.82m/s 均为 4 种配置模式中最低值。搭配 R2 散点式配置时,气流因受前排植物的阻挡在街道入风口形成低风速区,随后流经散点种植区域形成小型涡流且流速降低,后二次加速流出街谷,导致街谷内平均风速降低最不显著,降低率为 65.33%,平均风速 0.96m/s 和最大风速 4.11m/s 均为 4 种模式中最高值。

表 4 典型浅街峡谷建筑布局和植物配置模式下的风速比较

Table 4 Comparison of wind speed under different plant configuration patterns

建筑布局 Architectural layout	行列式(R) Rowed building layout						围合式(B) Back-shaped building layout					
植物配置模式 Plant configuration pattern	单一建筑	R0	R1	R2	R3	R4	单一建筑	B0	B1	B2	B3	B4
平均风速 Mean/(m/s)	2.76	0.69	0.89	0.96 [▲]	0.75	0.73 [▼]	2.75	0.68	0.76 [▲]	0.71	0.47 [▼]	0.60
最大风速 Max/(m/s)	4.04	2.16	3.26	4.11 [▲]	2.89	2.82 [▼]	3.63	2.01	2.24	2.52	2.03 [▼]	2.73 [▲]
最小风速 Min/(m/s)	0.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
平均风速降低率/% Mean wind speed reduction rate	—	—	67.56	65.33 [▼]	72.93	73.56 [▲]	—	—	72.29 [▼]	74.08	82.86 [▲]	78.23

建筑布局 Architectural layout	错列式(S) Staggered building layout					
植物配置模式 Plant configuration pattern	单一建筑	S0	S1	S2	S3	S4
平均风速 Mean/(m/s)	2.67	0.65	0.85 [▲]	0.74	0.73	0.71 [▼]
最大风速 Max/(m/s)	3.74	1.74	2.37	2.27 [▼]	2.53 [▲]	2.52
最小风速 Min/(m/s)	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
平均风速降低率/% Mean wind speed reduction rate	—	—	68.31 [▼]	72.47	72.76	73.60 [▲]

同一浅街峡谷布局下 4 种植物配置模式的风速中,▲表示最高值,▼表示最低值

3.4 典型浅街峡谷及植物配置模式下花粉浓度特征

为对比相同气象条件下、不同街谷和植物配置模式下的花粉浓度,参数化模拟 15 种典型场景的花粉浓度(图 4),计算各场景平均花粉浓度、花粉浓度降低率(表 5)。

围合式布局的气传花粉主要在街谷中央聚积。该布局平均花粉浓度高,为 542 粒/1000mm²,其中 B3 组团式配置浓度最高 571 粒/1000mm²,B1 行道树式配置浓度最低 516 粒/1000mm²。考虑为在低风速作用下,B3 内部形成局部环流,促使花粉聚积于街谷低风速区,导致局部花粉浓度增大。而 B1 风速相对较高,加快花粉飞散至街谷之外,有效降低街谷内部花粉浓度。

行列式布局的气传花粉主要在植物组团内聚积,也有部分沿风廊飞散。该布局平均花粉浓度居中,为 447 粒/1000mm²,其中 R4 行道树与组团式结合配置浓度最高 463 粒/1000mm²,R3 组团式配置浓度最低 440 粒/1000mm²。考虑为 R4 街谷内植物密度大且间距小,街谷内气流流速衰减较快,行道树形成的线性风廊虽加速街谷中心的花粉飞散和气流流通,但易导致花粉聚积于街谷两侧植物组团内。相比之下,R3 整体风速较高,气流流速衰减较慢,利于花粉随高风速气流飞散至街谷外。

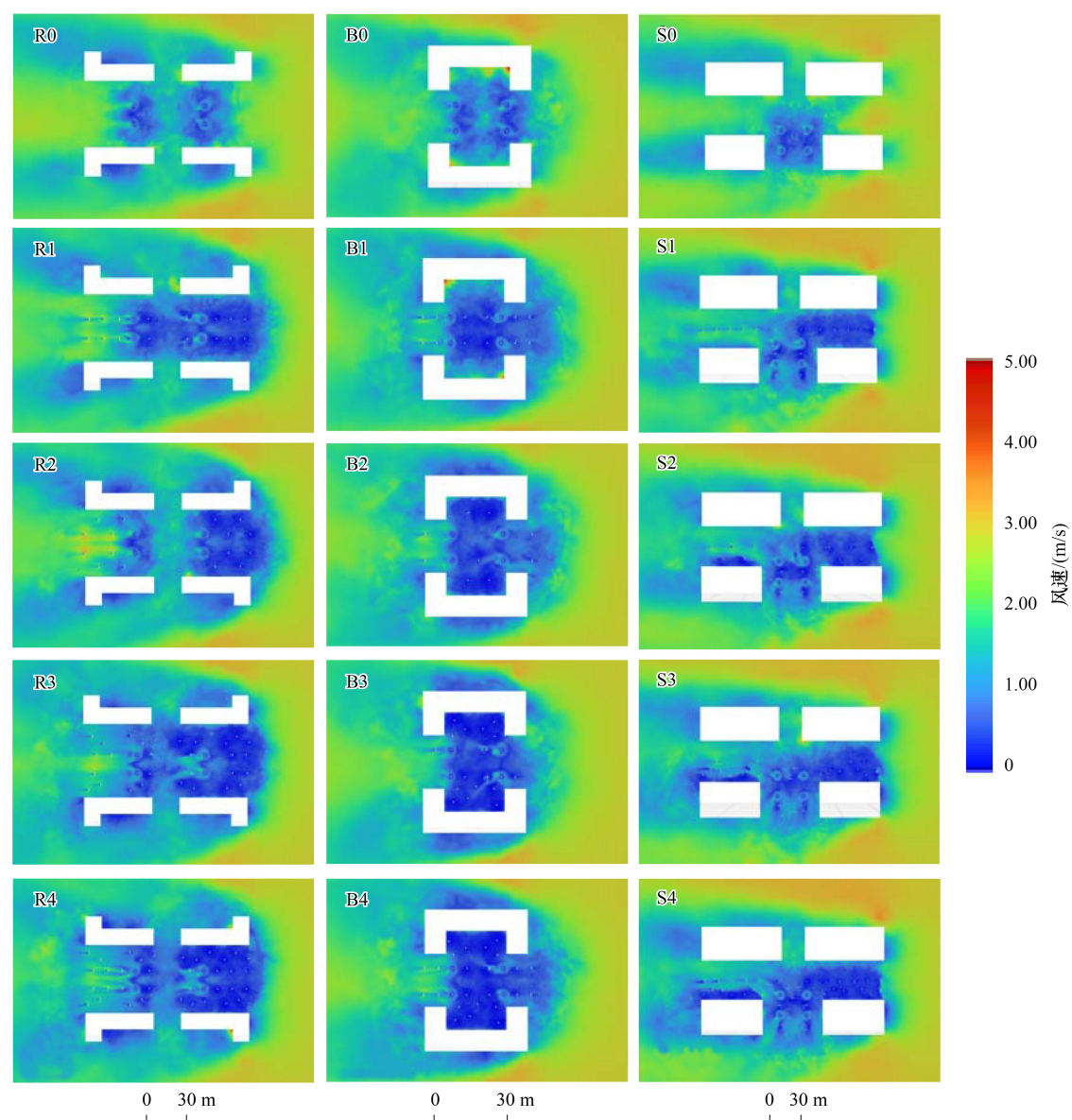


图 3 典型浅街峡谷植物配置模式(x - y 截面)风速云图

Fig.3 Typical shallow street canyon plant configuration patterns (x - y cross section) wind speed cloud map

R0:行列式布局对照组;R1:行列式布局+行道树式配置;R2:行列式布局+散点式配置;R3:行列式布局+组团式配置;R4:行列式布局+行道树与组团式结合配置;B0:围合式布局对照组;B1:围合式布局+行道树式配置;B2:围合式布局+散点式配置;B3:围合式布局+组团式配置;B4:围合式布局+行道树与组团式结合配置;S0:错列式布局对照组;S1:错列式布局+行道树式配置;S2:错列式布局+散点式配置;S3:错列式布局+组团式配置;S4:错列式布局+行道树与组团式结合配置

错列式布局的气传花粉主要聚积在建筑中央背风侧,也有部分沿风廊飞散。该布局平均花粉浓度最低,为 412 粒/1000mm²,其中 S2 散点式配置浓度最高 426 粒/1000mm²,S1 行道树式配置浓度最低 403 粒/1000mm²。结合风场模拟特征来看,S2 平均风速降低率略低于 S4,但花粉浓度高于 S4,考虑原因为 S2 最大风速低于 S4,S4 中的花粉随局部高速气流飞散至街谷外,与之相比 S2 整体风速均匀平缓,花粉聚积沉降在植物间隙内。S1 行道树式配置形成线性风道导致街谷整体风速增大,加快花粉飞散至街谷之外,从而降低内部花粉浓度。

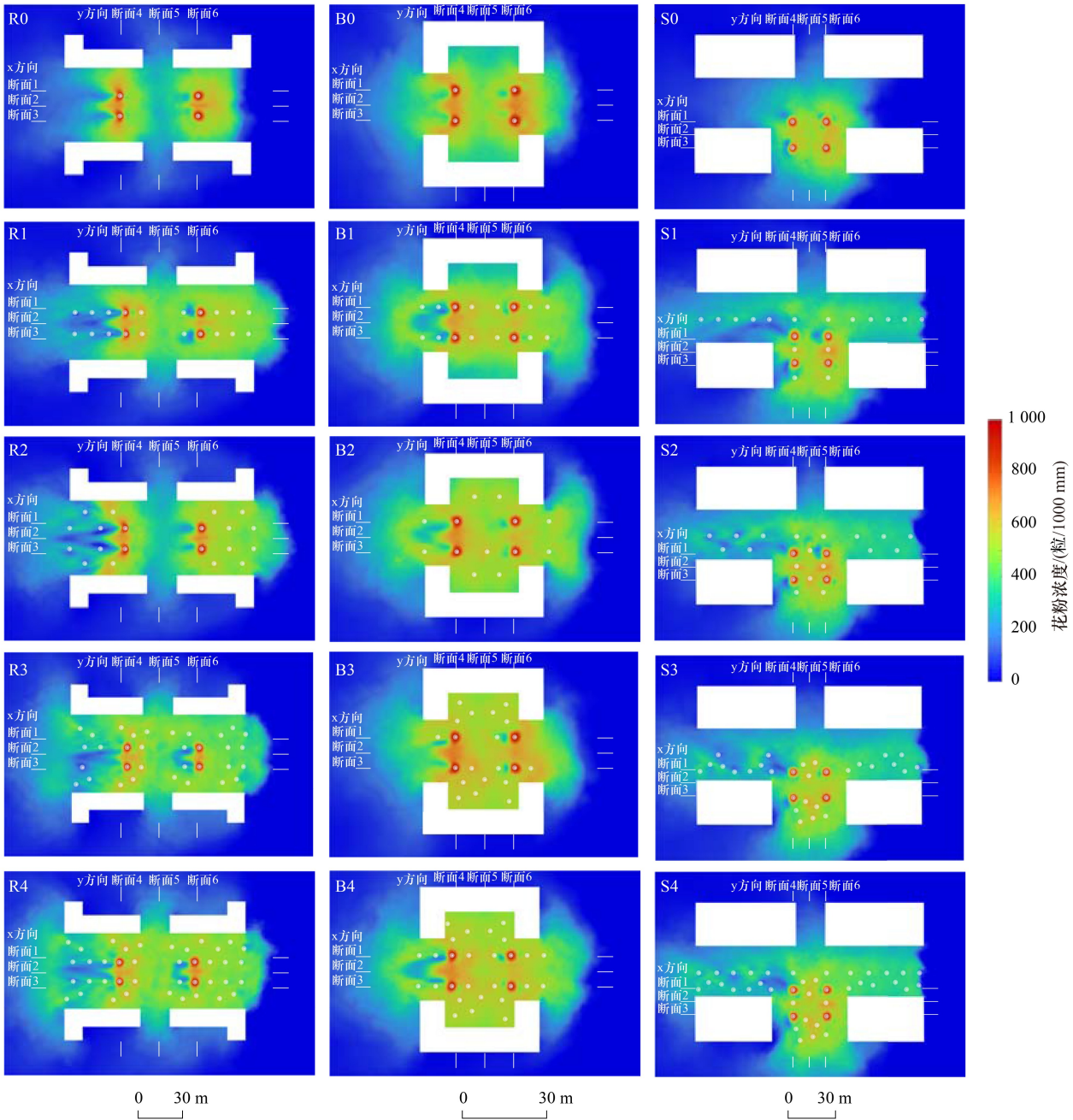


图 4 15 种典型场景花粉浓度分布图

Fig.4 Pollen concentration distribution map for 15 typical scenarios

表 5 典型浅街峡谷建筑布局和植物配置模式下的花粉浓度比较

Table 5 Comparison of pollen concentrations under typical shallow street canyon building layout and plant configuration patterns

建筑布局 Architectural layout	行列式(R)					围合式(B)					错列式(S)				
	Rowed building layout					Back-shaped building layout					Staggered building layout				
植物配置模式 Plant configuration pattern	R0	R1	R2	R3	R4	B0	B1	B2	B3	B4	S0	S1	S2	S3	S4
花粉浓度/(粒/1000mm ²) Pollen concentration	576	442	444	440▼	463▲	616	516▼	542	571▲	540	536	403▼	426▲	406	413
浓度降低率/% Concentration reduction rate	—	23.26	22.92	23.61▲	19.62▼	—	16.23▲	12.01	7.31▼	12.34	—	24.89▲	20.52▼	24.25	22.95

浓度降低率以各建筑布局的 0 号对照组为比较对象;同一浅街峡谷布局下 4 种植物配置模式的花粉浓度中,▲表示最高值,▼表示最低值

3.5 典型浅街峡谷布局及植物配置模式下花粉飞散特征

对场景特定位置进行剖切,输出 x 方向和 y 方向上花粉浓度与飞散距离关系图(图 5、6、7)。图中花粉浓度受街谷布局和植物配置影响整体变化曲线呈“M”形。

行列式布局中,迎风侧花粉浓度曲线从花粉源向外波动下降至 300—400 粒/1000mm²,随后直线降低至低浓度(0—100 粒/1000mm²),飞散距离约 35—45m;背风侧花粉浓度曲线先快速下降至中浓度,随后上升出现二次波峰,R1、R2 的峰值(200—300 粒/1000mm²)谷值(100—200 粒/1000mm²)相对较低,R3、R4 的峰值(300—400 粒/1000mm²)谷值(100—300 粒/1000mm²)相对较高,且曲线末端稳定降至低浓度的飞散距离较远约 65—75m,花粉主要沿街谷向外飞散,部分聚积在群落与建筑之间。其中,R3 花粉浓度降至低浓度水平所需飞散距离,在迎风侧约 40m,背风侧约 73m,街谷中央风廊风速高,向街谷外的飞散效果好。R4 花粉浓度降至低浓度水平所需飞散距离,在迎风侧约 35m,背风侧约 65m,相对较近,考虑为行道树式和组团式结合配置使街谷内部风速减缓,花粉浓度消减效率低。

围合式布局中,迎风侧花粉浓度曲线从花粉源波动下降至 400—500 粒/1000mm²,随后直线降低至低浓度(0—100 粒/1000mm²),飞散距离较近,约 28—45m;背风侧花粉浓度先快速下降至波谷(200—300 粒/1000mm²),随后在距花粉源 15—20m 出现二次波峰(500—600 粒/1000mm²),最终曲线末端下降至低浓度水平,飞散距离较远,约 55—60m,花粉主要聚积在街谷内部。其中,B3 花粉浓度降低至低浓度水平所需距离,在迎风侧约 28m,背风侧约 55m,均近于其他配置模式,使得街谷内部花粉浓度高,外溢飞散少,街谷聚积沉降作用明显。B1 花粉浓度降低至低浓度水平所需距离较远,在迎风侧约 36m,背风侧约 58m,街谷内部花粉浓度低、飞散距离远,相比其他配置模式的飞散效果好。

错列式布局中,花粉浓度曲线向两侧递减,随后曲线末端呈水平波动,并稳定在中浓度区间内(100—300 粒/1000mm²),迎风侧降至中浓度水平的飞散距离较远,约 48—53m,背风侧飞散距离较近,约 20—30m,飞散过程中花粉部分聚积在建筑与群落间的低风速区。其中,S2 花粉浓度降至中浓度水平背风侧所需飞散距离约 20m,距离最近,散点式植物配置的群落中央发挥了沉降消减作用。S1 花粉浓度降至中浓度背风侧所需飞散距离约 32m,部分花粉滞留于群落内,其余花粉沿风廊向街谷外飞散。

4 讨论

4.1 模型参数设置对模型性能的影响

在考虑浅街峡谷形态特征、气象因素、花粉浓度、植物配置模式等众多因素的基础上,建立洋白蜡花粉的参数化模拟模型,并用实测花粉浓度数据对模型进行有效性校验,相对误差结果基本控制在 30%左右。模拟过程中,主要关注了春季致敏植物洋白蜡的花粉浓度分布,并参考相关文献简化了街谷、建筑和植物形态。但考虑到不同开花时期花粉量存在差异,且实际街谷环境及内部植物空间复杂,所形成的环境小气候均存在不同程度的差异^[52]。因此,尽管本文建立的参数化模型能够在一定程度上模拟浅街峡谷中的花粉飞散过程,但受原始观测环境、花粉样本采集时间、街道峡谷立体形态精度等限制,在模型构建过程中仍存在一定不确定性,也是影响模型验证实测准确率的主要原因之一。

4.2 不同场景下的花粉飞散特征

研究结果表明花粉浓度的纵向分布受到建筑布局及植物配置模式影响,花粉高浓度区位于组团植物下部及风速较低、空气流动性较差的区域,花粉低浓度区位于浅街峡谷风廊或者风速高、空气流动性较好的区域。在围合式布局中,花粉多聚积于植物群落与建筑构成的空间内,少量沿道路边缘区域飞散,花粉浓度降低率整体较低,具体表现为组团式配置(7.31%)<散点式配置(12.01%)<行道树与组团式结合配置(12.34%)<行道树式配置(16.23%),因此围合式建筑布局搭配组团式植物配置,尽可能将花粉沉降于群落内部,减少道路边缘花粉飞散。在错列式布局中,花粉聚积分布在植物群落下部,花粉浓度降低率相对较高,具体表现为散点式配置(20.52%)<行道树和组团式结合配置(22.95%)<组团式配置(24.25%)<行道树式配置(24.89%),

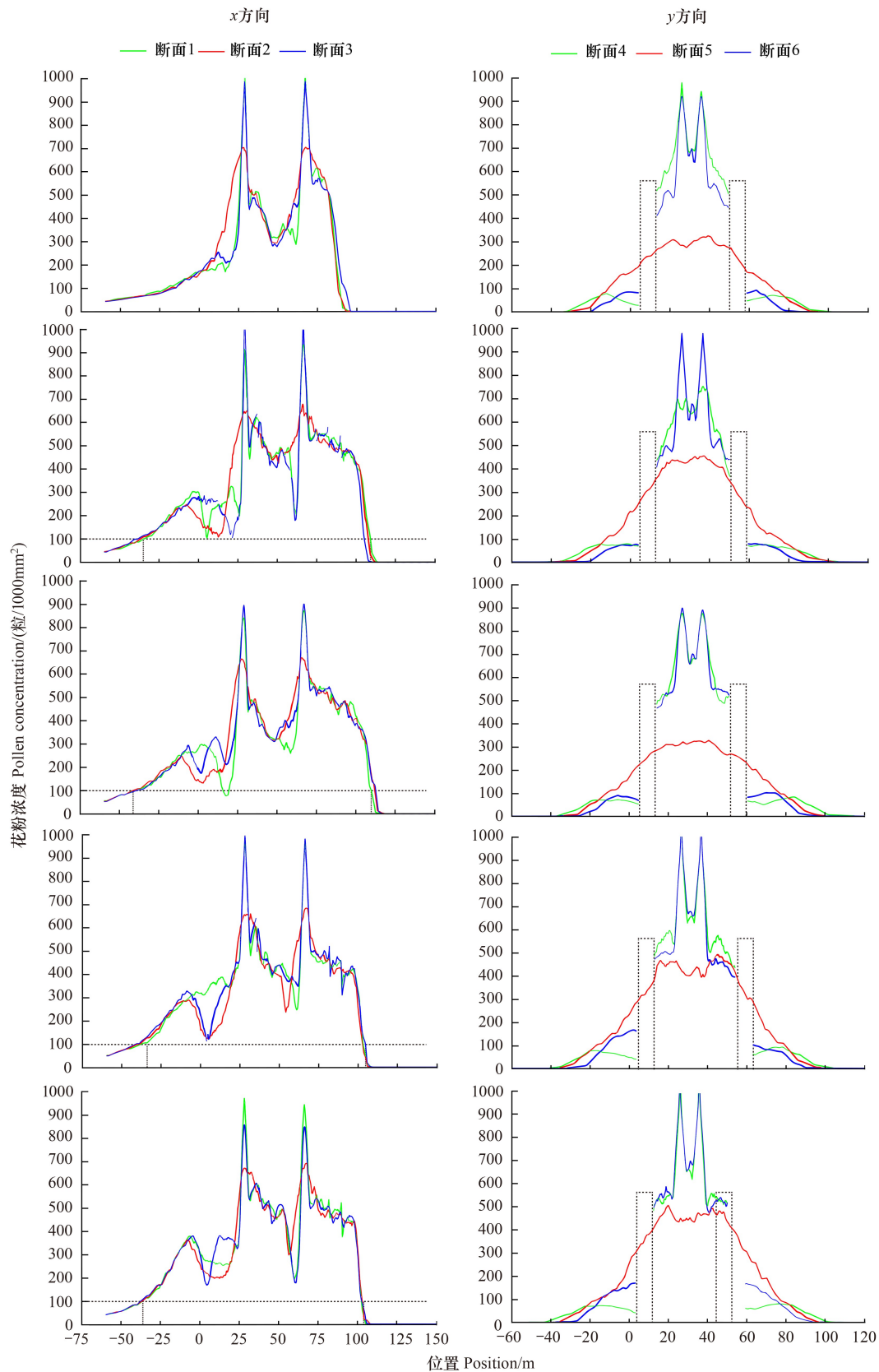


图5 行列式布局花粉浓度与飞散距离关系图

Fig.5 The relationship between pollen concentration and dispersion distance of rowed building layout
各飞散距离关系图曲线均对应图4 场景 R0 花粉浓度分布图示剖切位置

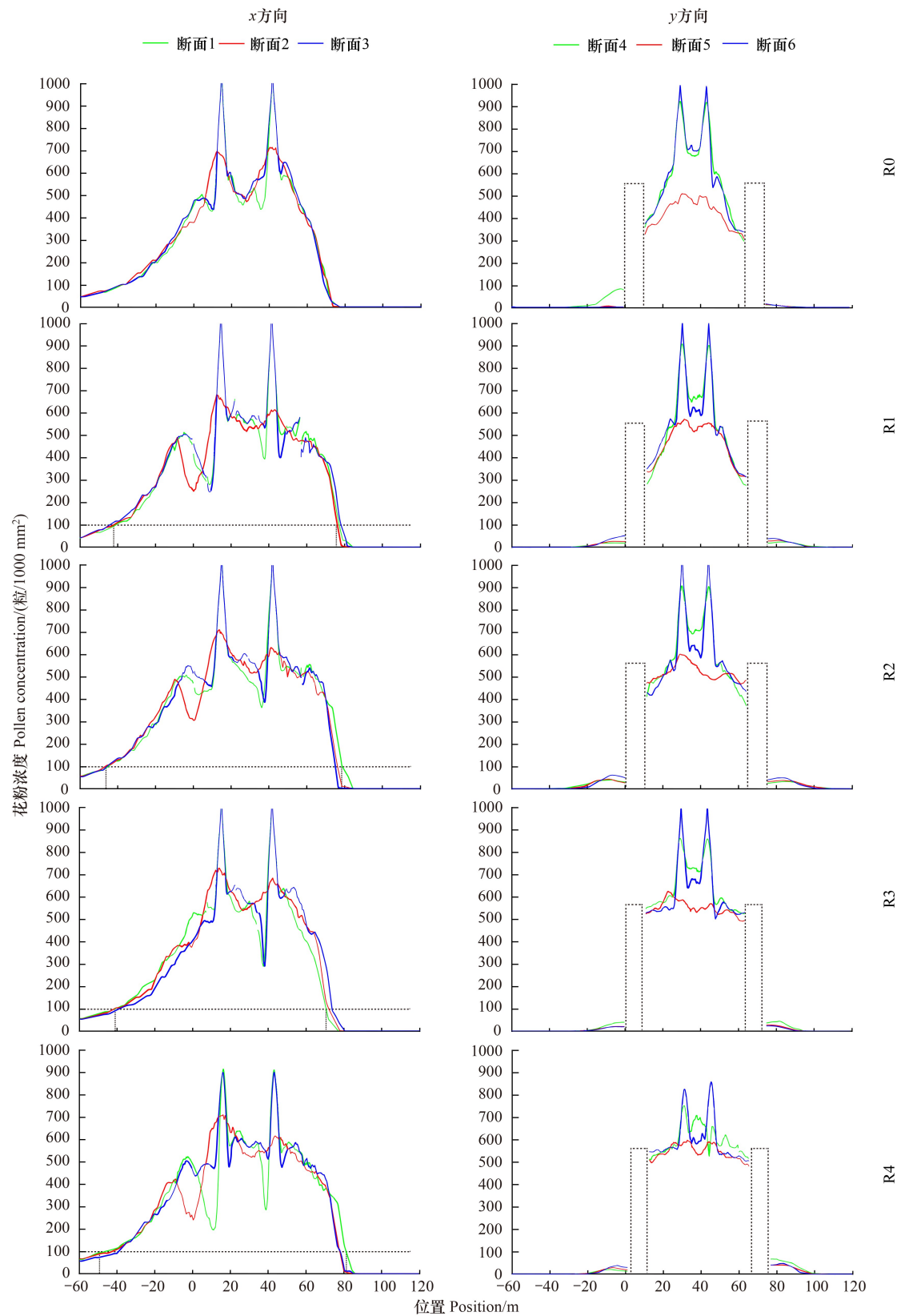


图6 围合式布局花粉浓度与飞散距离关系图

Fig.6 The relationship between pollen concentration and dispersal distance in the layout of the back-shaped building
各飞散距离关系图曲线均对应图4场景B0花粉浓度分布图示剖切位置

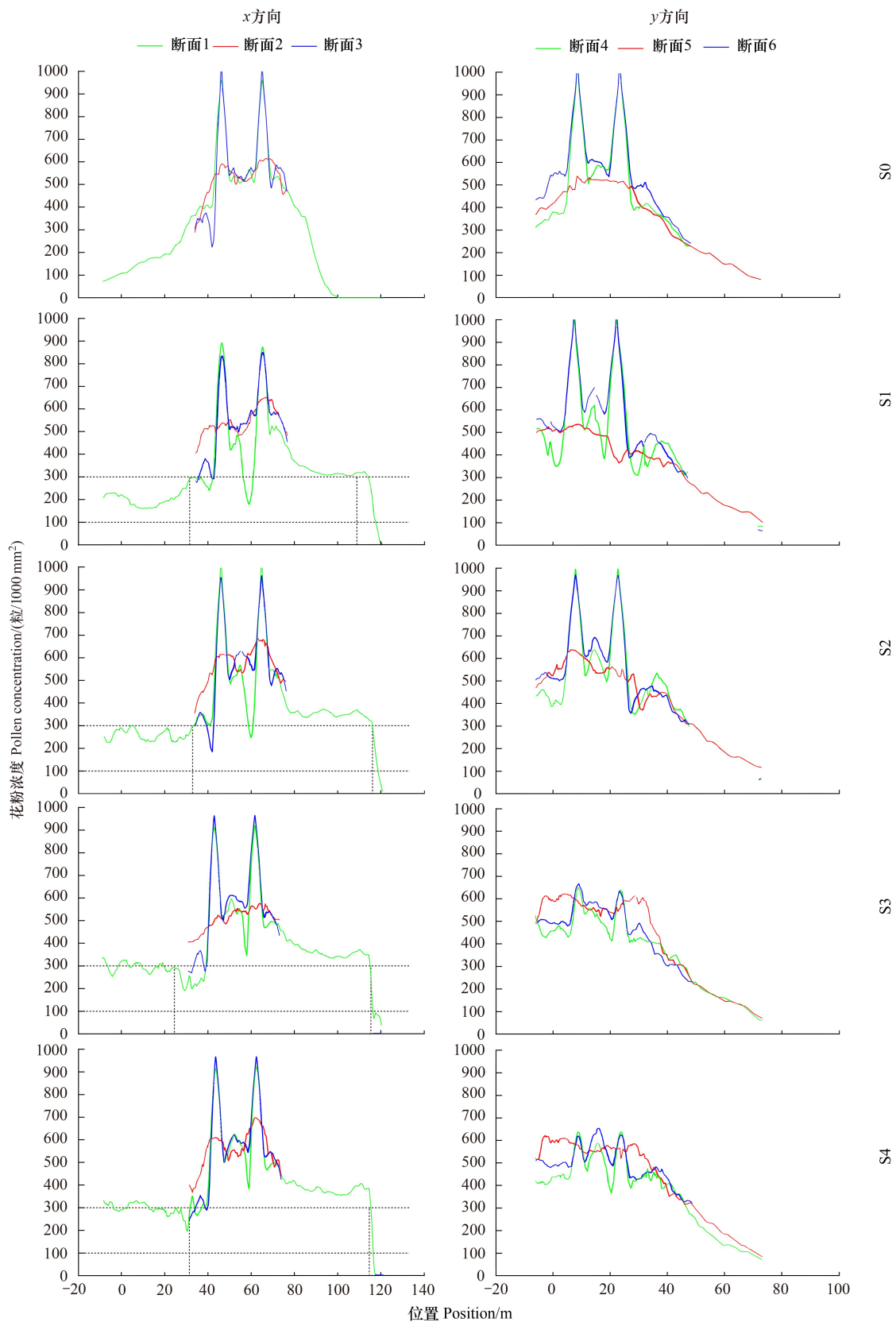


图7 错列式布局花粉浓度与飞散距离关系图

Fig.7 The relationship between pollen concentration and dispersion distance in staggered building layout

各飞散距离关系图曲线均对应图4 场景 S0 花粉浓度分布图示剖切位置

因此错列式建筑布局搭配散点式植物配置,尽可能将花粉沉降于群落内部;而搭配行道树式植物配置,促进花粉飞散至街谷之外,尽可能降低街谷内部花粉浓度。在行列式布局中,花粉浓度降低率具体表现为行道树与组团式结合配置(19.62%)<散点式配置(22.92%)<行道树式配置(23.26%)<组团式配置(23.61%),该类建筑布局整体花粉飞散效果更优,植物组团会造成街谷内小范围花粉聚积。

4.3 不同花粉浓度区域的绿地规划建设策略

虽然使用非致敏性植物进行更新替换是减少花粉暴露风险、预防花粉过敏症的最有效措施^[53],但城市中已栽种的植物形成了良好的景观环境和生态效益不容忽视,在已建成绿地的管理和更新优化过程中,不应对待致敏植物进行机械式地更新替换。因此,可以考虑针对致敏植物种植集中的高花粉浓度区域,可优化道路布局、调整空间要素,尽量减少人群停留时间较长的活动场地布设。在附属绿地建设时,规划易于形成风廊的建筑布局,在上风口设置非致敏性植物形成隔离带,控制致敏花粉在浅街峡谷内部的进出,以达到降低致敏风险的目的。此外,有关部门也可通过气象预报、花粉预警、花粉科普宣传等方式,提醒人们在高花粉浓度时期避免开窗通风,降低春秋季节的花粉暴露风险。

5 结论

基于北京市海淀区校园绿地春季观测数据,提取3个采样地街谷布局和植物特征参数提取,借助CFD平台构建15个典型浅街峡谷布局及其植物配置模式参数化场景,模拟不同场景下的花粉飞散特征,得出以下结论:

(1)不同浅街峡谷建筑布局下,平均风速大小排序为行列式>围合式>错列式。增加植物配置后的围合式、错列式、行列式3种街谷内行人高度风速分别为0.47—0.76m/s、0.65—0.85m/s、0.69—0.96m/s。风速降低率表现为围合式>错列式>行列式,其中围合式布局相比无植物配置时风速降低率最大为76.87%。4种植物配置模式中,组团式配置结合围合式布局风速降低率最显著,为82.86%。

(2)不同建筑布局和植物配置影响下,花粉的飞散和聚积区域不同,总体表现为:在建筑或植物背风侧聚积,沿浅街峡谷风廊飞散。花粉浓度由高到低进行排序为围合式>行列式>错列式。错列式布局搭配行道树式配置花粉浓度降低率最高为24.89%,飞散效果相对更好。围合式布局搭配组团式配置花粉浓度降低率最低为7.31%,聚积效果相对较好。

(3)不同建筑、植物和风场影响下,花粉的飞散距离不同,飞散距离大小排序为行列式>围合式>错列式。行列式需要约35—75m的飞散距离,围合式需要约28—60m的飞散距离,错列式需要约20—53m的飞散距离。从飞散角度看,围合式布局不利于飞散,行列式布局有利于飞散,其中飞散效率好的是行列式布局搭配组团式配置,飞散效率低的是围合式布局搭配组团式配置。从聚积角度看,行列式布局不利于聚积,错列式布局有利于聚积,其中聚积效率好的是错列式布局搭配行道树和组团式结合配置,聚集效率低的是行列式布局搭配组团式配置。在绿地规划设计时,可考虑根据应用场景选择降低花粉浓度的植物配置模式,根据花粉飞散和聚积特征判断绿地更新优化的侧重点,为植物群落搭配及园林空间环境的营造提供参考。

参考文献(References):

- [1] 刘晓佳,梁红宇,邓卓怡,王宏宇,黄海云,萨日娜,刘晓玲.建立气传花粉日播报平台对过敏性鼻炎防治的意义及相关因素分析.内蒙古医科大学学报,2020,42(6):606-609.
- [2] 马楠,付晶,孟昭君,杨一佳,李健.2019—2021年同期春季过敏性结膜炎的急诊构成差异及原因探讨.眼科,2021,30(5):369-373.
- [3] Asher M I, Montefort S, Björkstén B, Lai C K, Strachan D P, Weiland S K, Williams H. Worldwide time trends in the prevalence of symptoms of asthma, allergic rhinoconjunctivitis, and eczema in childhood: ISAAC Phases One and Three repeat multicountry cross-sectional surveys. The Lancet, 2006, 368(9537):733-743.
- [4] 杨琼梁,欧阳婷,颜红,杨晶,李玲,夏新华.花粉过敏的研究进展.中国农学通报,2015,31(24):163-167.
- [5] 何海娟,王良录,张宏誉.北京城区空气中花粉分析.中华临床免疫和变态反应杂志,2008,2(3):179-183.
- [6] 廖凤林.城市空气花粉污染评价.城市环境与城市生态,2000,13(3):45-46.

- [7] 王成. 城市花粉、飞絮飞毛等植源性污染特征及其防治. 中国城市林业, 2018, 16(1): 1-6.
- [8] 全国绿化委员会办公室. 2021 年中国国土绿化状况公报. 国土绿化, 2022(3): 13-17.
- [9] Xin J N, Ouyang Z Y, Zheng H, Wang X K, Miao H. Allergenic pollen plants and their influential factors in urban areas. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(9): 3820-3827.
- [10] 周江鸿, 夏菲, 车少臣, 李新宇, 李洁, 刘育俭, 张卉, 叶彩华, 尤焕苓. 城市绿地春季潜在花粉污染风险评估. 中国城市林业, 2022, 20(4): 1-6.
- [11] Kawashima S, Thibaudon M, Matsuda S, Fujita T, Lemonis N, Clot B, Oliver G. Automated pollen monitoring system using laser optics for observing seasonal changes in the concentration of total airborne pollen. *Aerobiologia*, 2017, 33(3): 351-362.
- [12] 齐晨, 姜江, 叶彩华, 尤焕苓, 乔媛, 沙祎, 白帆. 北京主要气传致敏花粉年浓度峰值日期预测. 生态学报, 2023(7): 1-13.
- [13] Menut L. Interactive comment on “a new model of ragweed pollen release based on the analysis of meteorological conditions” by L. Menut et al. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, 14: 10891-10927.
- [14] 侯晓玲, 向莉. 花粉及其相关气象因素对过敏性疾病的预警作用. 中华临床免疫和变态反应杂志, 2022, 16(4): 446-448.
- [15] 刘宜纲, 吕世华, 刘建忠, 刘文军, 黄开龙, 张嘉仪, 欧阳显辉, 李瑛. 2012—2016 年海淀区气传花粉物候特征及其与气象要素的关系. 应用生态学报, 2019, 30(10): 3563-3571.
- [16] 孟龄, 王效科, 欧阳志云, 任玉芬, 王巧环. 北京城区气传花粉季节特征及与气象条件关系. 环境科学, 2016, 37(2): 452-458.
- [17] 李英, 李月丛, 吕素青, 许清海. 石家庄市空气花粉散布规律及与气候因子的关系. 生态学报, 2014, 34(6): 1575-1586.
- [18] 张军, 徐新, 张增信, 张强, 闫少峰. 南京市空气中花粉特征及其与气象条件关系. 气象与环境学报, 2009, 25(5): 67-71.
- [19] Katelaris C H, Burke T V, Byth K. Spatial variability in the pollen count in Sydney, Australia; can one sampling site accurately reflect the pollen count for a region? *Annals of Allergy, Asthma & Immunology*, 2004, 93(2): 131-136.
- [20] Galán C, Alcázar P, Cariñanos P, García H, Domínguez-Vilches E. Meteorological factors affecting daily Urticaceae pollen counts in southwest Spain. *International Journal of Biometeorology*, 2000, 43(4): 191-195.
- [21] Kizilpınar I, Civelek E, Tuncer A, Dogan C, Karabulut E, Sahiner U M, Yavuz S T, Sackesen C. Pollen counts and their relationship to meteorological factors in Ankara, Turkey during 2005-2008. *International Journal of Biometeorology*, 2011, 55(4): 623-631.
- [22] El Haskouri F, Bouziane H, del Mar Trigo M, Kadiri M, Kazzaz M. Airborne ascospores in Tetouan (NW Morocco) and meteorological parameters. *Aerobiologia*, 2016, 32(4): 669-681.
- [23] Severova E, Volkova O. Variations and trends of Betula pollen seasons in Moscow (Russia) in relation to meteorological parameters. *Aerobiologia*, 2017, 33(2): 253-264.
- [24] 张姝丽, 张德山, 何海娟. 北京城区花粉数量天气条件分析. 气象科技, 2003, 31(6): 406-408.
- [25] Robichaud A, Comtois P. Numerical modelling of birch pollen dispersion in Canada. *Environmental Research*, 2021, 194: 110554.
- [26] Schueler S, Schlünzen K H. Modeling of oak pollen dispersal on the landscape level with a mesoscale atmospheric model. *Environmental Modeling & Assessment*, 2006, 11(3): 179-194.
- [27] Goyette-Pernot J, Mun oz-Alpizar R, Blanchet J P, Goyette S, Beniston M. Analysing ragweed pollen cloud over Montreal City Center, *Proceedings of the 5th International Conference on Urban Climate*, 2003.
- [28] Pietrowicz J, Pasken R. Testing of mesoscale meteorological models as a tool to forecast pollen concentrations, 12th PSU/NCAR Mesoscale Modelling System Users' Workshop NCAR, 2002.
- [29] Beckett K P, Freer-Smith P H, Taylor G. Particulate pollution capture by urban trees: effect of species and windspeed. *Global Change Biology*, 2000, 6(8): 995-1003.
- [30] 崔鹏义, 张岩, 王梦洁, 黄远东, 陶文铨. 绿化对街道峡谷内对流传质影响的数值模拟研究. 工程热物理学报, 2019, 40(7): 1648-1654.
- [31] Moonen P, Gromke C, Dorer V. Performance assessment of Large Eddy Simulation (LES) for modeling dispersion in an urban street canyon with tree planting. *Atmospheric Environment*, 2013, 75: 66-76.
- [32] 王友君, 亢燕铭, 陈勇航. 建筑和绿化对街谷空气污染物扩散的影响. 东华大学学报: 自然科学版, 2012, 38(6): 740-744, 770.
- [33] Gromke C, Buccolieri R, Di Sabatino S, Ruck B. Dispersion study in a street canyon with tree planting by means of wind tunnel and numerical investigations-Evaluation of CFD data with experimental data. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(37): 8640-8650.
- [34] Yang H Y, Chen T H, Lin Y Y, et al. Integrated impacts of tree planting and street aspect ratios on CO dispersion and personal exposure in full-scale street canyons. *Building and environment*, 2020, 169: 106529.
- [35] Wania A, Bruse M, Blond N, Weber C. Analysing the influence of different street vegetation on traffic-induced particle dispersion using microscale simulations. *Journal of Environmental Management*, 2012, 94(1): 91-101.
- [36] Morakinyo T E, Lam Y F. Simulation study of dispersion and removal of particulate matter from traffic by road-side vegetation barrier. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(7): 6709-6722.

- [37] 芮丽燕. 城市街道交叉口的形态及绿化对通风的影响[D]. 南京: 南京大学, 2019.
- [38] 周姝雯, 唐荣莉, 张育新, 马克明. 街道峡谷绿化带设置对空气流场及污染分布的影响模拟研究. 生态学报, 2018, 38(17): 6348-6357.
- [39] 杨培华, 樊军锋. 美国洋白蜡引种育苗试验初报. 陕西林业科技, 2006(2): 31-32.
- [40] 王琰, 余韵, 刘勇, 王开勇, 周晓杰, 王洋. 北京市核心区洋白蜡行道树健康评价及影响因素. 浙江农林大学学报, 2022, 39(6): 1340-1349.
- [41] 王瑞琦, 周俊雄, 尹佳, 王良录, 支玉香, 孙劲旅, 李宏, 文利平, 关凯, 顾建青, 汤蕊, 李丽莎, 王子熹, 徐涛. 洋白蜡花粉变应原点刺皮试液用于诊断洋白蜡花粉过敏的临床评价. 中华临床免疫和变态反应杂志, 2017, 11(3): 209-215.
- [42] 中国气象局. 气传花粉暴片观测规范: QX/T 42—2006. 北京: 气象出版社, 2006.
- [43] Thordal M S, Bennetsen J C, Koss H H H. Review for practical application of CFD for the determination of wind load on high-rise buildings. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2019, 186: 155-168.
- [44] Toja-Silva F, Kono T, Peralta C, Lopez-Garcia O, Chen J. A review of computational fluid dynamics (CFD) simulations of the wind flow around buildings for urban wind energy exploitation. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2018, 180: 66-87.
- [45] Franke J, Hellsten A, Schlünzen K, Carissimo B. The COST 732 Best Practice Guideline for CFD simulation of flows in the urban environment: a summary. International Journal of Environment and Pollution, 2011, 44(1/2/3/4): 419-427.
- [46] Richards P, Norris S. Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models revisited. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2010, 99(4): 257-266.
- [47] Yoshida H, Omae M. An approach for analysis of urban morphology: methods to derive morphological properties of city blocks by using an urban landscape model and their interpretations. Computers, Environment and Urban Systems, 2005, 29(2): 223-247.
- [48] 中国建筑标准设计研究院有限公司. 建筑信息模型分类和编码标准: GB/T 51269-2017. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [49] 于森, 陈颖, 丁康, 马嘉, 李运远. 基于 CART 决策树模型的北京市春季气传花粉浓度与植被空间结构关系研究. 北京林业大学学报, 2023, 45(1): 121-131.
- [50] 张小利, 丁建云, 崔建臣, 孙国强, 段永恒, 杨得草, 赵振霞, 潘洪吉. 豚草花粉监测与花粉过敏的研究进展. 植物检疫, 2020, 34(4): 47-52.
- [51] 孔咪, 田曼. 蒿草花粉所致气道过敏性疾病的研究进展. 现代医学, 2022, 50(7): 913-918.
- [52] 郝日明, 张璐, 张明娟, 向其柏, 臧德奎. 影响南京地区桂花秋季开花期变化的关键气候因子研究. 植物资源与环境学报, 2006, 15(3): 31-34.
- [53] 张曼琳, 潘妮, 赵娟娟, 李明娟, 江南. 城市花粉致敏植物种类构成、分布与潜在危害评估——以深圳市为例. 生态学报, 2021, 41(22): 8746-8757.