校园局部风环境模拟分析与改进方法

——以天津大学为例

张豪 高辉 陈铖

（天津大学建筑学院绿色建筑研究所，天津 300072）

摘要：风对于建筑物理环境影响较大，对校园环境进行室外风环境测算评估是大学校园环境舒适性与安全性的基本前提和重要保障。本文以天津大学局部环境为例，运用 CFD 模拟软件 Fluent Airpak 对其进行室外风环境数值模拟与研究。通过模拟，从风速分布、压力分布、平均空气龄等方面对建成方案进行了整体评估并提出了一些具体可行的改进措施，旨在通过数值仿真与分析对优化校园风环境做出努力，并从室外风环境舒适性的角度对当前大学校园建筑的规划与设计提供借鉴和参考。

关键词：校园局部风环境　数值模拟　风速与压力分布　平均空气龄

SIMULATION-BASED ANALYSIS FOR LOCAL WIND ENVIRONMENT IN TIANJIN UNIVERSITY

Zhang Hao　Gao Hui　Chen Cheng

（Green Building Institute at School of Architecture, Tianjin University, Tianjin 300072 ）

Abstract: It is widely recognised that wind exerts a great impact on the outdoor physical environment. To ensure the campus environment comfortable and safe, the outdoor wind environment has been assessed in this paper. This research focuses on the outdoor wind environment simulation for Tianjin university in Qilitai by utilizing the simulation tools 'Fluent airpak2.1'. The campus environment is modeled to have the overall evaluation on the required parameters such as wind speed distribution, wind pressure distribution and mean air age. In this way, simulation-based support for optimizing wind environment is put forward, which also could be an important reference for the modern campus design in terms of outdoor environment comfort.

Key words: Local wind environment　Wind simulation　Wind speed and pressure distribution　Mean air age

能源世界—中国建筑节能网 http://www.chinagb.net

1. 引言

2002 年 9 月，天津大学明确提出率先建设国内首座绿色生态校园的发展目标[1]。在绿色校园环境的建设中，人体的舒适度和安全性是最为重要的评价指标，而气流是主要影响因素之一。近年来，随着计算流体学的发展，基于 CFD（Computational Fluid Dynamic）的各种流体力学的软件因其便捷省时和结果可靠的强大优势，被广泛应用于室外风环境的模拟与研究。本研究采用 CFD 软件 Fluent Airpak 对天津大学校园进行局部风环境进行模拟与分析，并在此研究结果的基础上对校园环境提出具体改进措施。

2. 风环境数字化模型

2.1 天津市气象概况

天津位于华北平原东北部，在中国建筑气候区划中，天津属于寒冷地区[2]。天津市区风速的总体趋势是:春季、秋季主导风向是西南偏南风，夏季则多是南风，冬季是西北偏北风。天津市区室外夏季平均风速 1.7m/s，冬季平均风速 2.1 m/s，春季平均风速最大，为 5.0 m/s[3]。

在校园风环境设计中需主要考虑以下几点：

(一)冬季主要考虑室外人行活动区域应尽量避风，以及建筑局部区域风压过大可能会导致冷风渗透室内。

(二)夏季主要考虑露天公共场所借助风力降低气温，提高舒适性及建筑物表面利用风力散热。

(三)春秋季主要考虑室内利用自然通风，获取新鲜空气。

因此，本研究分为冬季、夏季、过渡季（以春季为例）三部分进行。各季节

能源世界—中国建筑节能网 http://www.chinagb.net

风向参数计算条件设定如表 1 所示：

参数 / 季节	风向	风速（m/s）
冬季	NNW	2.1
夏季	S	1.7
过渡季	SSW	5.0

表 1 各季节模拟参数设定

2.2 天津大学具体校园环境选定

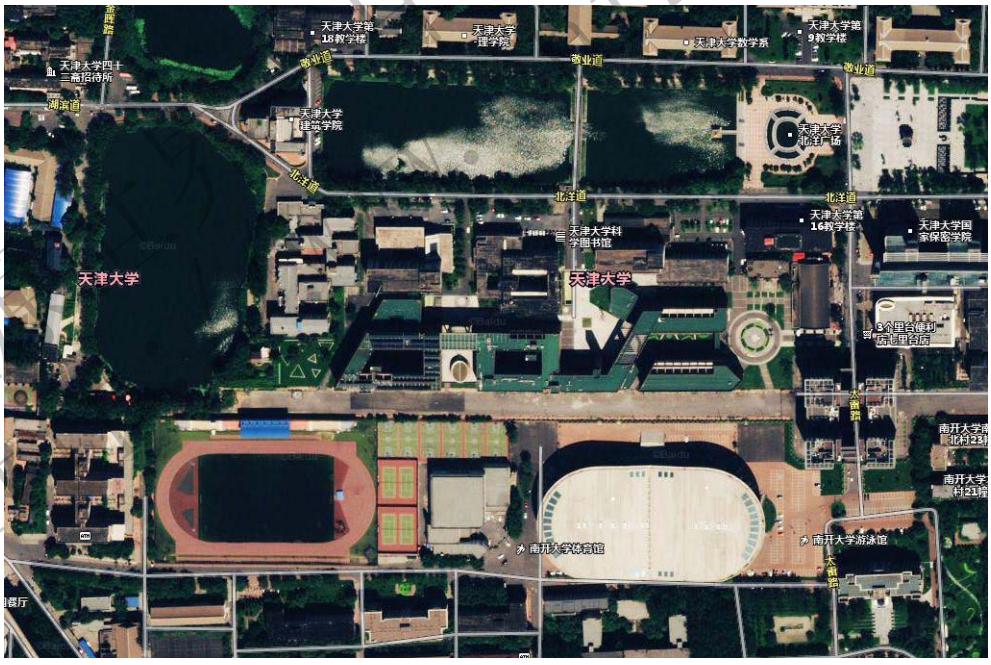


图 1 片区总平面图

学校坐落在天津市南开区七里台，第 26 教学楼是目前校园内最大的教学办公建筑，第 26 教学楼周边 300 米范围内有友谊湖、敬业湖等水体，办公楼、图

书馆、食堂、游泳馆、体育场等建筑及构筑物，共同形成了以教学活动为中心的综合片区（总平面图如图 1），片区内日常活动的学生与教职工有近千人之多。

2.3 模拟范围划定

考虑到 Airpak 软件的网格划分与模拟计算，选定以第 26 教学楼为研究中心，1400m（X）×800m（Y）×110m（Z）的区域作为模拟范围，保证模拟范围内空气流动充分、稳定；选定 10m（X）×10m（Y）×5m（Z）作为计算网格，保证模拟结果的准确性（模型见图 2）。模型迭代次数设置合理，收敛良好，误差控制在要求以内。

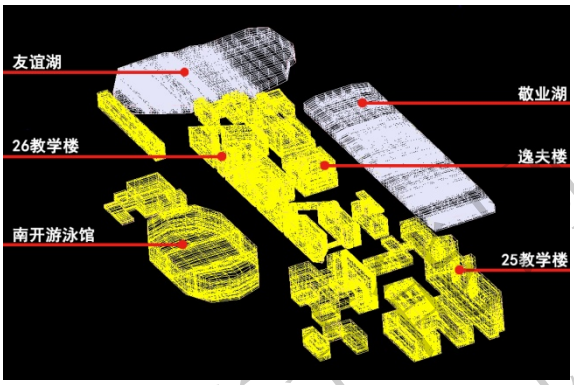


图 2 模型网格划分

2.4 计算边界条件

室外气流主要是指大气底层室外气流，一般属于低速流范围，且风速成典型的梯度分布，空气可做 Boussinesq 假设，为粘性、不可压缩流体。在不同的湍流模型理论中，采用数值波动较小、精度相对较高的标准 k-ε 模型，包含流面的湍流脉动动能 K 和湍流脉动动能耗散率 ε 两个参量。[4]

2.4.1 入口边界设定

对垂直方向风速分布的描述可用公式：$U = U_0(Z/Z_0)^{\alpha}$ 描述，公式中，U 为高度为 Z 处的风速；U_0 为标准高度处的风速，本文取距地面 10m 高度处的风速。为简化计算，设定近地面风速不变；Z_0 为标准高度 10m；Z 为所求风速位置的高度；α 为粗糙度指数，本算例中均取 0.14 进行计算。模拟过程中，湍流模型

能源世界—中国建筑节能网 http://www.chinagb.net

选用 K—εRNG 标准数学模型。

2.4.2 出口边界设定

假定出流面上的流动已充分发展，流动已经恢复为无建筑阻碍时的正常流动，即出口压强为自然大气压。

3. 数字模拟与分析

考虑到相关规范、人体舒适度要求以及本案例自身情况，选取人行高度 Z=1.5m、标准层高度 Z=10m、屋面高度 Z=20m 三个典型水平截面，区域内风压分布和平均空气龄分布等几个分析角度，分别对冬季、夏季、过渡季（以春季为例）三种工况进行模拟分析。

3.1 冬季工况

3.1.1 水平截面风速分布

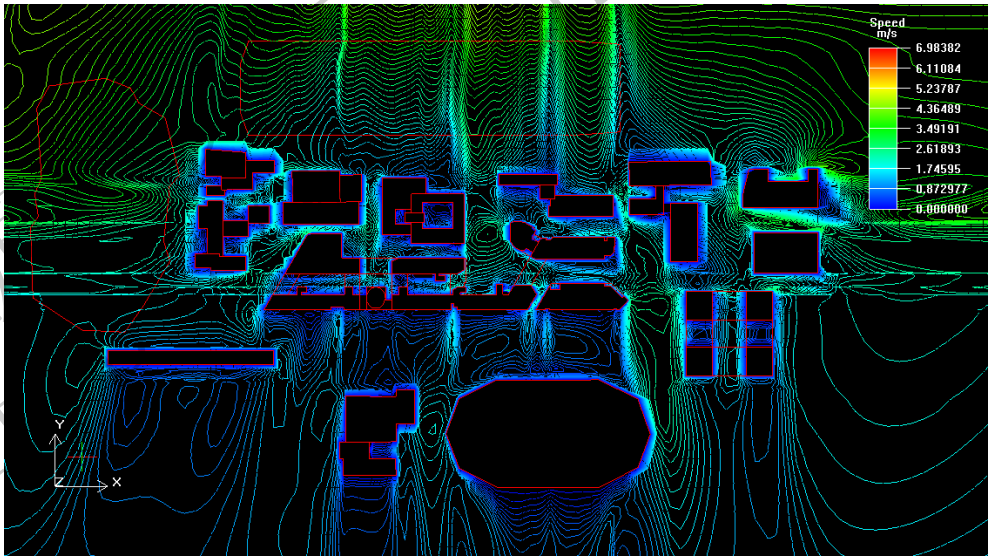


图 3 Z=1.5m 处风速分布等值线图

人行高度水平截面，风速分布如图 3 所示。从风速分布来看，所选区域内风速基本在 3m/s 以内，根据凯文·林奇在《总体设计》一书中给出的“风的影响表”

可知，对应风级为“微风”，表现为树叶及微枝摇动不息，旌旗展开，基本符合人在户外活动的要求。建筑间距合理，使得气流均匀平缓地穿过整个片区。

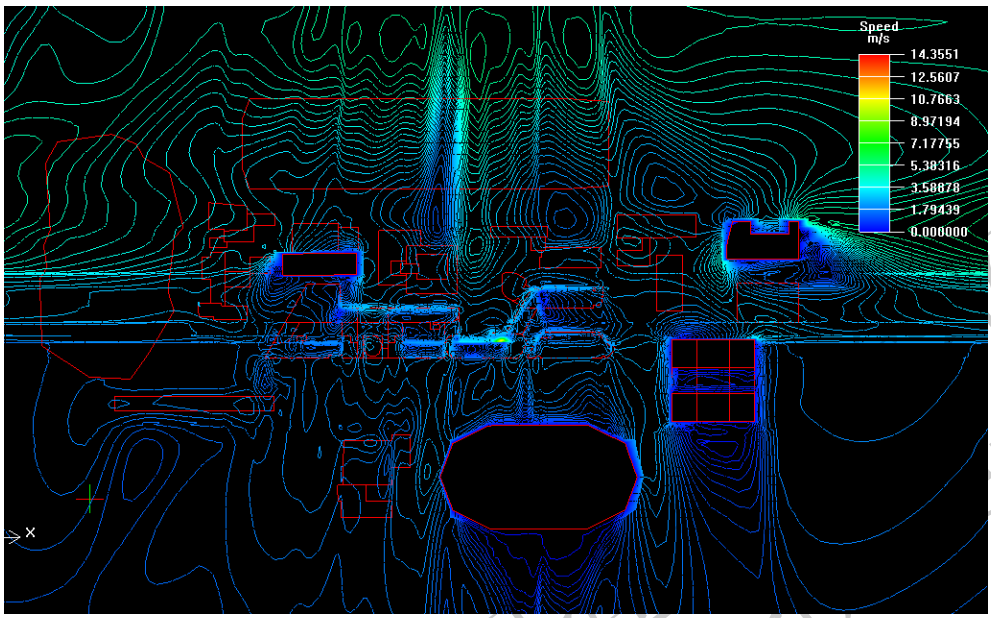


图 4 Z=20m 处风速分布等值线图

屋面高度水平截面，风速分布如图 4。风速在 7m/s 左右，风速较大，更值得注意的是，26 楼两个庭院上空风速达到区域内最大值 8.2m/s，附近房间需要加强密封保暖，减少窗户开启时间，防止冷空气进入室内。

3.1.2 区域内风压分布

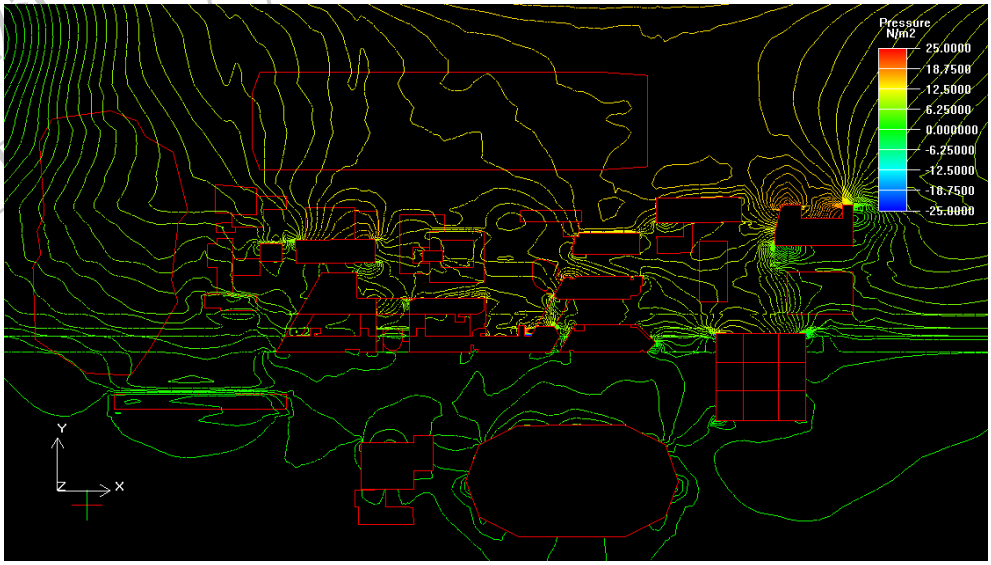


图 5 Z=20m 处风压分布等值线图

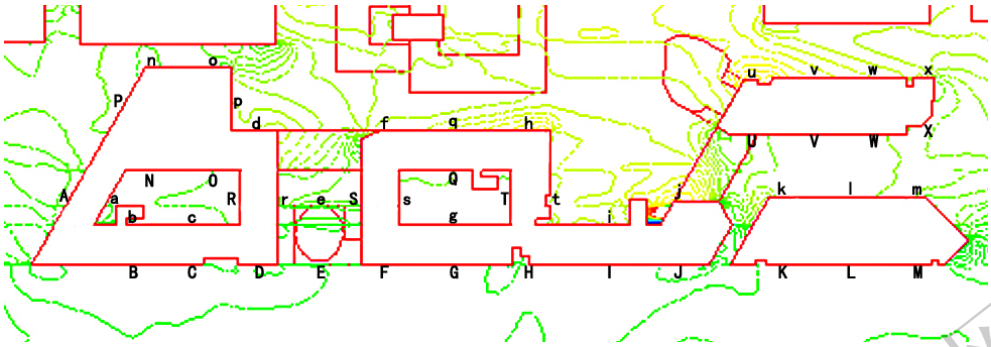


图 6 测点布置图

测点	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
风压值	5.6	1.4	1.2	1	1.5	1.8	1.8	1.9	1.9	1.2	2.2	2.4
对应测点	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l
风压值	5.5	5.5	5.8	9.9	5.9	10.1	6.8	12.4	10.5	13	8.3	8
风压差值	0.1	-4.1	-4.6	-8.9	-4.4	-8.3	-5	-10.5	-8.6	-11.8	-6.1	-5.6
测点	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X
风压值	2.2	5.7	5.5	6.3	7	5.3	6.2	6.8	7.6	8.3	8.1	7.8
对应测点	m	n	o	p	q	r	s	t	u	v	w	x
风压值	7.6	5.9	5.9	9.5	11	7	6.9	10	13.8	12.1	10.9	10.4
风压差值	-5.4	-0.2	-0.4	-3.2	-4	-1.7	-0.7	-3.2	-6.2	-3.8	-2.8	-2.6

表 2 Z=20m 处测点风压统计表

屋面高度风压分布如图 5，在建筑迎风侧、背风侧布置成对测点（图 6），对应测点间气压差值统计如表 2 所示。由表可知，26 楼受风面和背风面存在 6～9Pa 的压差，最大风压差达 11.8Pa，可能会造成明显的冷风渗透现象，因此需要

能源世界—中国建筑节能网 http://www.chinagb.net

注意提高门窗气密性，增强建筑的密封性能。

3.2 夏季工况

3.2.1 水平截面风速分布



图 7 Z=1.5m 处风速分布等值线图

人行高度水平截面，风速分布如图 7 所示。26 楼受南侧游泳馆的涡流区影响较大，来风速度降低。整体来看，片区内风速偏低，最大值仅为 4.4m/s，仅能够引起人轻微的感官感觉。建筑物排列较为紧密，迎风侧建筑的涡流区会明显影响到下游建筑的受风，不利于建筑物夏季利用自然气流散热。

能源世界—中国 http://www.chi

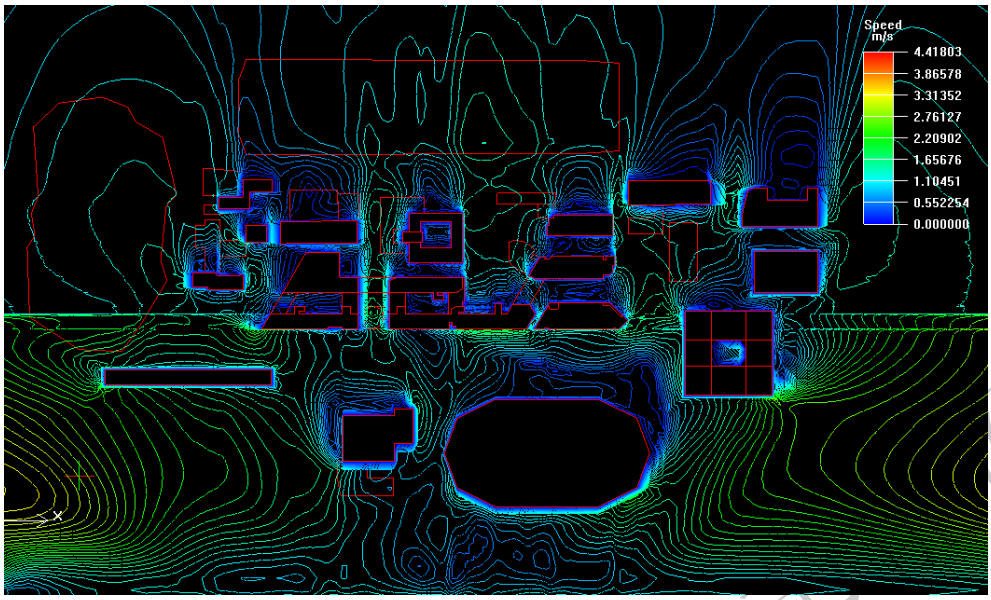


图 8 Z=10m 处风速分布等值线图

标准层高度水平截面，风速分布如图 8 所示。片区内风速基本在 2m/s 以内，自然通风潜力较低。天津夏季太阳辐射强烈，户外气温高，因此应选择在清晨和黄昏进行适量自然通风，中午及下午则关闭门窗，充分遮阳，阻隔太阳辐射进入。

3.2.2 区域内风压分布

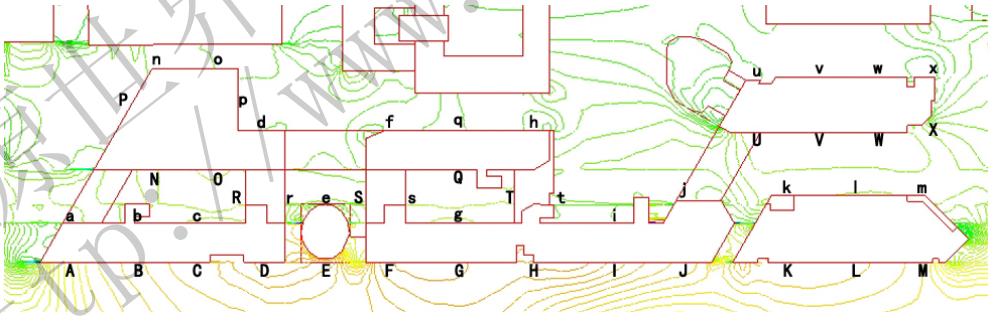


图 9 测点布置图

对应测点 / 高度	A-a	B-b	C-c	D-d	E-e	F-e	G-g	H-h	I-i	J-j	K-k	L-l
Z=1.5	1.7	2.0	2.0		2.5		1.9		2.2	2.2	2.3	2.1
Z=10	1.8	2.1	2.2	3.8	3.2	3.8	2.6	4.0	3.6	2.9	2.5	2.4

能源世界—中国建筑节能网 http://www.chinaeb.net

Z=20		2.0	2.2	3.1		3.3	2.7	2.9	3.7	3.3	2.5	2.3
高度 \ 对应测点	M-m	N-n	O-o	P-p	Q-q	R-r	S-s	T-t	U-u	V-v	W-w	X-x
Z=1.5	1.9	0.6	0.7	0.2	0.9				0.8	0.7	0.7	0.4
Z=10	2.2	0.7	0.9	0.3	1.3	0.7	-0.9	1.0	1.3	1.2	1.2	1.0
Z=20	2.2	0.6	0.8	0.2	1.0	0.4	-0.5	0.7	0.9	0.8	0.8	0.5

表 3 对应测点风压差值统计表①

以标准层高度 Z=10 m 处风压分布为例，在 26 楼受风面和背风面均布成对测点（如图 9），对应测点间气压差值表征自然通风能力潜力大小。不同高度截面气压差值统计见表 3。由表知，26 楼受风面与背风面气压差值在 2Pa 左右，自然通风能力弱。在炎热夏季，室外空气温度高，应考虑采取立面遮阳结合机械通风的策略来提高室内的舒适性。

3.2.4 平均空气龄分布

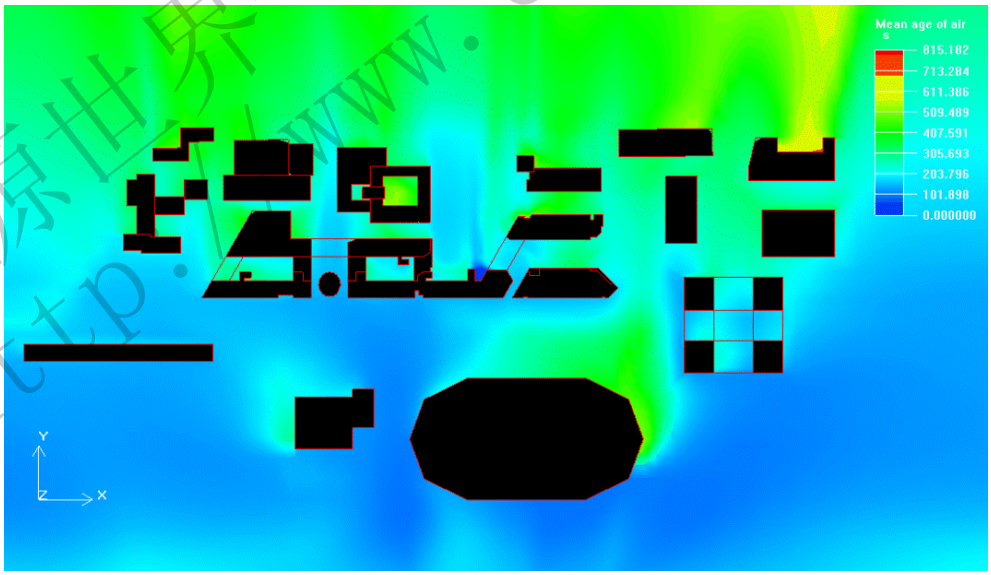


图 10 Z=10m 处平均空气龄分布云图

① 由于局部建筑造型变化，造成各不同高度水平截面有所不同，填充斜线的表格表示无法布置的测点。

能源世界—中国建筑节能网 http://www.chinagb.net

标准层高度平均空气龄分布如图 10。夏季工况下，片区内平均空气龄较长，普遍处于 300s～450s 之间，说明建筑物周边环境空气循环速度慢，新风量低，空气质量较差，可能会对户外活动造成不良影响。

3.3 过渡季（以春季为例）工况

3.3.1 水平截面风速分布

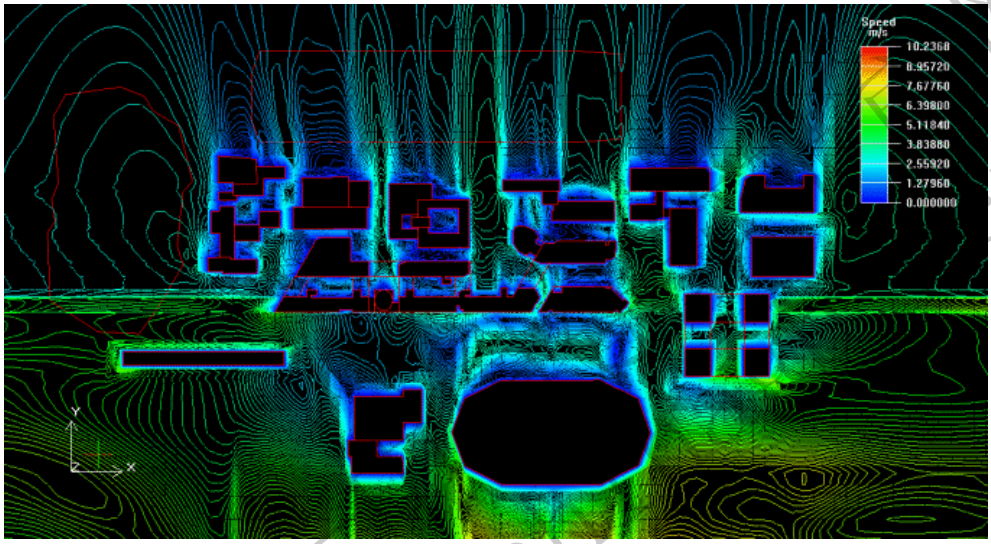


图 11 Z=1.5m 处风速分布等值线图

人行高度水平截面，风速分布如图 11 所示。春季平均风向为 SSW，风速 5.0 m/s，区域内迎风侧风速均在 5 m/s 左右，最大值可达 7.2 m/s，风速较高，风力强劲。另外风场分布均匀度较差，局部区域形成明显的“风口”、“风洞”，会对途经的师生造成较大影响。

3.3.2 区域内风压分布

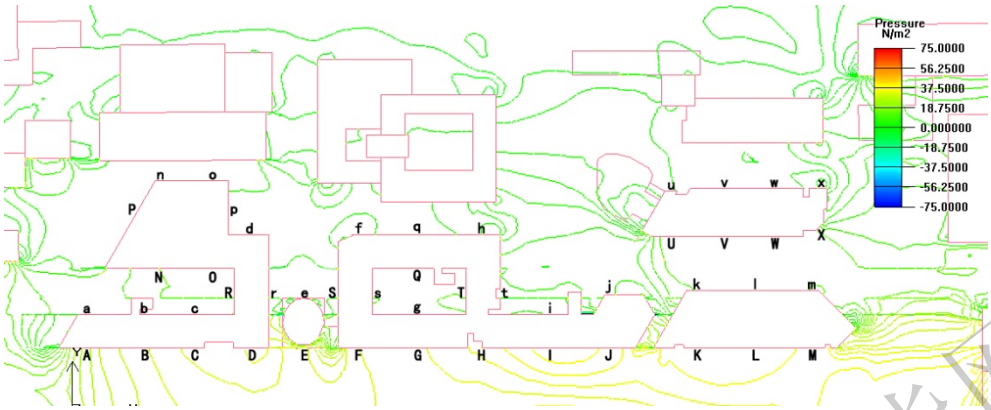


图 12 测点布置图

对应测点 / 高度	A-a	B-b	C-c	D-d	E-e	F-e	G-g	H-h	I-i	J-j	K-k	L-l
Z=1.5	11.7	13.7	15.1		19.8		13.0		29.7	28.2	23.7	12.8
Z=10	11.0	13.2	15.3	24.1	18.9	22.7	16.0	27.9	28.4	24.7	20.4	19.8
Z=20		15.7	18.6	27.8		23.6	19.3	32.8	37.2	29.6	23.4	22.3
对应测点 / 高度	M-m	N-n	O-o	P-p	Q-q	R-r	S-s	T-t	U-u	V-v	W-w	X-x
Z=1.5	18.4	5.0	7.2	1.7	8.4				9.1	9.0	9.9	9.6
Z=10	19.0	4.6	6.1	1.7	8.1	5.2	-5.7	5.7	10.0	9.6	9.5	9.8
Z=20	24.5	5.2	7.2	2.0	9.6	3.2	-4.2	7.1	10.1	10.9	11.4	10.3

表 4 对应测点气压差值统计②

以标准层高度 Z=10 m 处风压分布为例，在 26 楼迎风侧和背风侧均布成对测点（如图 12）。不同高度截面气压差值统计见表 4，由表可知，26 楼受风面与背风面之间气压差值多在 10Pa 以上，具有很大的自然通风潜力。春季室外气候温和，充分利用自然通风，可以有效降低空调系统负担，有利于建筑节能。但

② 由于局部建筑造型变化，造成各不同高度水平截面有所不同，填充斜线的表格表示无法布置的测点。

能源世界—中国建筑节能网 http://www.chinagb.net

26 楼东西贯长的体型布局阻挡了来风深入片区北部，受其影响，其北侧的建筑利用自然通风的潜力较低。

3.3.3 平均空气龄分布



图 13 Z=10m 处平均空气龄分布云图

标准层高度平均空气龄分布如图 13。春季工况下，观测区域内风速高，空气流通快，平均空气龄基本处于 100s～200s 之间，说明建筑物周边空气更新速度快，空气清新，为室内利用自然通风获得新风提供了基础保证。26 楼的几个内庭院中平均空气龄均在 100s 左右，空气质量较高。

4. 评价与总结

4.1 整体评价

通过以上模拟和分析可知：

（一）冬季，观测片区在风速、风力、风压、平均空气龄等方面基本可以满足室外风环境的各项指标要求，可以保证师生室外活动的安全性，但舒适性有待提高。建筑局部需要提高气密性，增强保温隔热措施，防止冷风渗透。

（二）夏季，观测片区的气流情况不容乐观，平均风速低、建筑物间互相影

能源世界—中国建筑节能网 http://www.chinagb.net

响、平均空气龄长等现象对自然通风的利用造成了消极影响，但其主要是受天津当地气候条件所限，1.7m/s 的平均风速是进行通风和散热的主要制约因素。

（三）过渡季（以春季为例），观测片区风速高、风力较大，可能会对室外活动的舒适性和安全性造成一定影响。建筑物表面风压差大，平均空气龄低，为室内进行自然通风创造了有利条件。

4.2 改进措施

针对片区已经完全建成并投入日常教学使用的现状，主要从软环境方面考虑提高片区室外风环境质量，改善局部微气候：



图 14 26 楼东侧广场实景



图 15 26 楼主入口广场实景

（一）增加广场绿化。片区内两大公共活动空间是 26 楼主入口广场和东侧广场，均为进入片区的重要交通空间，人流量大。目前，两处广场均比较空旷，只有零星几棵高大乔木，草坪绿地很少，难以吸引人停留，实景图片见图 14、图 15。冬季空旷的广场寒风肆虐，给师生驻车、往来、停留带来极大不便；



能源世界—建筑节能网 http://www.cnbeb.net

夏季强烈的太阳辐射会造成户外气温快速升高，炙烤往来师生。因此，考虑在广场上种植围合型树阵，冬季遮挡风沙、夏季遮荫蔽日，同时，可以结合设置一些公共座椅，给师生讨论问题、课间休息等活动提供条件。

（二）发展垂直绿化。第 26 教学楼两个内庭院存在的主要问题是平均空气龄较长，加之天津市整体空气质量较差，空气中悬浮颗粒物含量较高，因此考虑结合现有立面设计，在环绕庭院的建筑立面上加挂垂直绿化装置，既能起到降噪除尘、清新空气的作用，又可以丰富建筑立面，使两个庭院从周边深褐色过火砖的校园大环境中脱颖而出，改造后效果如图 16。

意图

4.3 总结展望

气流活动直接影响到人类的安居环境。良好的室外风环境有助于减轻城市热岛效应、有助于创造宜人的微环境气候、有助于创建良好的室内空气环境。通过对天津大学校园局部区域风环境进行研究、模拟与分析，能够为未来进一步研究教学建筑内部空气环境提供依据和基础，也可以为优化校园的环境质量、提升校园建筑品质提供准确、有效的意见和建议，还可以为校园建筑的规划和设计提供一定借鉴和指导。

能源世界—中国建筑节能网 http://www.chinagb.net

参考文献

[1] 张梦薇 刘延军 孙卫军. 天津大学将建成全国首座生态大学[EB/OL].

http://news.sina.com.cn/e/2002-09-07/1149711626.html，2002.09.07.

[2] 国家规范.建筑气候区划标准（GB50178-93）.北京：中国计划出版社，2005.

[3] 中国气象局气象信息中心气象资料室.中国建筑热环境分析专用气象数据集[M].中国建筑工业出版社,2005.04.

[4] 宋明洁 刘刚．中新天津生态城中心 CBD 风环境数值分析[J]．建筑技艺，2011.05

[5] 严凤英等．城市住宅小区建筑室内外环境对局部气候的影响[J]．太阳能学报，2010.04.

[6] 张爱社 顾明 张陵．建筑群行人高度风环境的数值模拟[J]．同济大学学报，2007.08.

[7] 江明．居住小区风环境模拟与分析 [J]．山西建筑，2008.02.

[8] 陈飞．高层建筑风环境研究[J]．建筑学报，2008.02.

[9] 赵万英 马金花．建筑物周围人行高度风环境质量评估[J]．工业建筑，2006.03.

[10] 沈绮 王国砚 顾明．某商业街区建筑风压及风环境数值模拟 [J]．力学季刊，2006.06.

能源世界—中国建筑节能网 http://www.chinagb.net