

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2020.04.001

不同气候条件下典型城市的体育馆 自然通风模拟及潜力分析

赵福云, 刘宝, 成瑾, 徐颖, 申广

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 对夏热冬暖与温和气候条件下的典型城市体育馆进行了自然通风数值模拟及潜力分析。首先, 对两种气候条件下的典型城市体育馆进行了自然通风数值模拟; 然后, 通过对比不同地区典型城市夏季、冬季和过渡季节的气流组织和舒适性分布情况, 提出了合理的风压驱动自然风设计策略; 最后, 对不同气候条件下典型性城市的体育馆自然通风进行了潜力分析。

关键词: 体育馆; 自然通风; 潜力分析; 数值模拟

中图分类号: TU245.2; TU834 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-9833(2020)04-0001-09

引文格式: 赵福云, 刘宝, 成瑾, 等. 不同气候条件下典型城市的体育馆自然通风模拟及潜力分析[J]. 湖南工业大学学报, 2020, 34(4): 1-9.

Natural Ventilation Simulation and Potential Analysis of Gymnasiums in Typical Cities Under Different Climatic Conditions

ZHAO Fuyun, LIU Bao, CHENG Jin, XU Ying, SHEN Guang

(College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: A numerical simulation and potential analysis of natural ventilation have been carried out in a typical urban gymnasiums under the conditions of hot summer and warm winter. Firstly, a numerical simulation has been made of natural ventilation in typical urban gymnasiums under two climatic conditions. Then, by comparing the airflow organization and comfort distribution of typical cities in different regions during summer, winter and transitional seasons, a reasonable wind pressure driven natural wind design strategy has thus been proposed, followed by a potential analysis of the natural ventilation of gymnasiums in typical cities under different climatic conditions.

Keywords: gymnasium; natural ventilation; potential analysis; numerical simulation

0 引言

我国在体育事业蓬勃发展的同时也会消耗巨大的能源, 2013年中国的体育馆建筑约有2.59亿 m^2 ,

就综合体育馆来说, 每平方米的能耗约为住宅类建筑的10倍。体育馆建筑的节能有利于节约能源, 促进人类的可持续性发展。作为常见的公共建筑, 体育馆内部的温度和湿度常采用空调进行调节, 这样会

收稿日期: 2019-07-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51208192), 湖南省杰出青年基金资助项目(14JJ1002)

作者简介: 赵福云(1977-), 男, 湖南株洲人, 湖南工业大学副教授, 主要从事建筑通风, 城市通风及计算流体力学方面的教学与研究, E-mail: zfyfdnet@163.com

消耗很多能源,而且也会导致空间热舒适水平较低。一般来说,不同地区的气候条件是不同的,当室外空气参数较为合适时,采用自然通风换气,建筑空间的热舒适度要高于空调调节的。

对于一般建筑,使用自然通风的非常多,但是体育馆这种空间跨度比较大的自然通风设计,无论在理论研究上或现实工程中都很少见,这对于自然通风设计来说是一个短板。体育场的特点是空间跨度比较大,根据其特点研究如何利用自然通风的风压驱动来调节其内部的温湿度,这不管是从节省能源方面来说,还是从基础科学研究上来说都是非常有意义的一件事情。国内有学者从自然采光和自然通风两个方面对高校体育馆进行了研究^[1-2];还有学者对亚热带气候地区的体育馆进行了研究,进而提出一些针对当地气候中体育馆的节能设计^[3];以及根据寒冷气候地区的温湿度、日照时间和来流风等特点,提供了体育场的低能耗方案,综合考虑了温度、湿度、阳光照射及建筑周围来流风等多因素的影响^[4]。同时,国外的学者也通过对体育馆周围的来流风进行数值模拟,得到了建筑顶部开窗的大小可以影响自然通风对体育馆内部温湿度的调节的结论,开窗尺寸越大,自然通风对于体育馆内部环境调节的效果越好^[5],以及利用实验结果获得计算通气结果的最佳解决方案^[6]。随着计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)的兴起,大批学者利用CFD对体育建筑的热舒适性进行设计、测量和评估,减少建筑物的能耗^[7-10];有文献利用CFD技术研究了在大型半封闭体育场的自然通风可行性^[11];还有一些文献^[12-13]分析了公共建筑的能效潜力。通过软件进行数值模拟,针对建筑物的本身结构、气候特征、采光系统及保温材料等因素采用光伏技术、自然通风、热回收等技术,可以很大程度上降低能耗^[14]。本文通过对夏热冬暖与温和气候条件下的典型城市体育馆进行模拟分析,进而分析典型城市体育馆的自然通风潜力,对体育馆的节能提供设计依据。

1 体育馆风压驱动自然通风模型

1.1 模型建立和网格划分

通过对国内外现有体育馆相关文献及标准的整理,发现体育馆有规则型和不规则型,而其中类圆形体育馆一般为椭圆形,其内部常采用椭圆型坐席,此类体育馆所占比例高达61%。而在类圆形体育馆中对称凹曲下凹式类型普适性较高,因此本次体育馆模型选为对称凹曲下凹式类型^[15]。

建筑模型为不规则类圆形,建筑无外檐,屋面中

心向下凹,建筑边缘与水平方向成 10° ,中心高度约为30 m。如图1a所示,设体育馆平面半径 $R=50$ m,立面最高点高度 $H=30$ m,倾斜角为 10° 。屋面下凹处设置天窗,竖直高度为1.5 m,半径为5 m。窗的分布相同,窗高均为1.5 m,单侧窗总宽为25 m。离地面最近窗的中线距地面3.75 m,离地面最远窗的中线距地面22.25 m,中间窗的中线距地面7.25 m。设定计算域的长和高,分别为 $15R=750$ m、 $6R=300$ m,同时模型进风面放置于计算区域,进风口 $3R=150$ m处,如图1b所示。

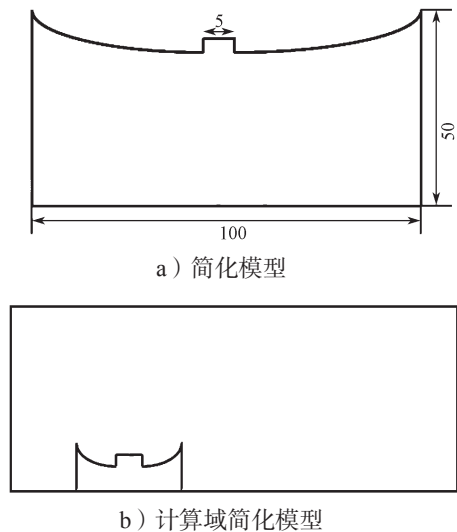


图1 体育馆平面及计算域简化模型

Fig.1 Simplified plane calculation model for gymnasiums

本文采用Fluent模拟流场,通常采用无量纲距离来表示空气流动受到的避免黏滞力影响,一般将无量纲距离 y^+ 控制在11.5~400,为获取进风口处的良好数据,选择在开口位置进行网格加密。为获取较好的处理结果,进行网格独立化验证,选择粗糙(Grid A),基础(Grid B),精细(Grid C)3种网格,其中粗糙的网格数为76 101,基础的网格数132 854,精细的网格数为291 902,如图2所示。

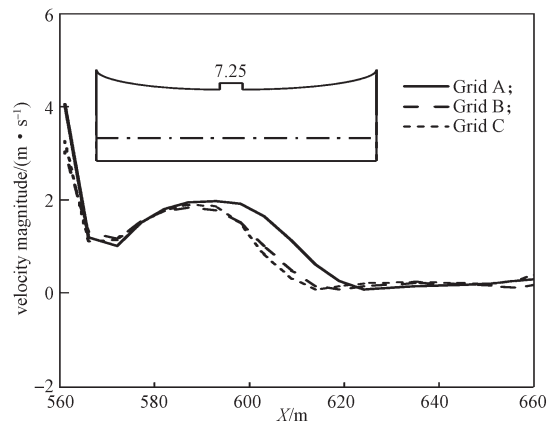


图2 体育馆模型网格独立性验证

Fig.2 Verification of grid independence of gymnasium model

1.2 边界条件和求解设置

入口边界条件设定为 velocity-inlet, 并且入口风速采用梯度风, 如图3所示(图片来源于建筑科学研究院资料)。出口采用 outflow 自由出口边界, 顶部和两侧采用 symmetry 对称边界条件。

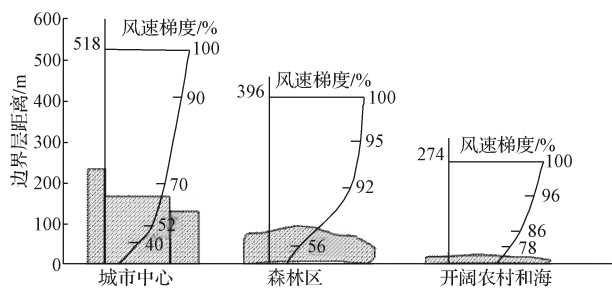


图3 不同地形大气边界层风廓线

Fig. 3 Wind profiles of atmospheric boundary layers over different terrains

2 体育馆风压驱动自然通风模拟

2.1 不同气候地区体育馆的风速及最佳朝向计算

本文所研究的两个气候区划如表1所示。根据每个城市的气候条件数据, 利用 Ecotect 软件模拟不同地区典型城市中体育馆的风环境并计算了平均风速, 如表2所示。

表1 建筑气候区划

Table 1 Architectural climate zoning

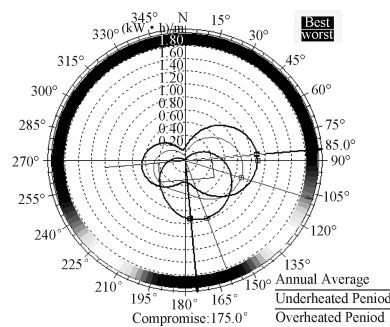
分区代号	分区名称	气候主要指标	代表城市
I	A	1月平均气温高于10℃	广州
	B	7月平均气温25~29℃	南宁
II	A	1月平均气温0~13℃	昆明
	B	7月平均气温18~25℃	西昌

表2 不同地区城市中体育馆的平均风速

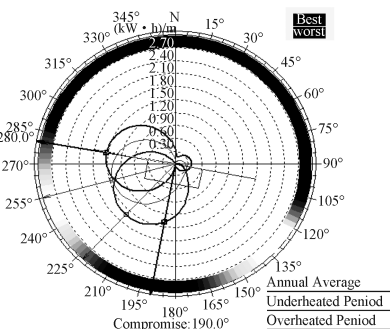
Table 2 Average wind speed of gymnasiums in different cities

地点	平均风速/(m·s ⁻¹)					
	春季	夏季	秋季	冬季	全年	
I	广州	6.7	6.0	5.8	4.8	5.8
	南宁	4.4	2.6	3.4	3.5	3.7
II	昆明	2.2	1.2	1.1	1.2	1.4
	西昌	4.4	4.2	3.4	4.3	4.1

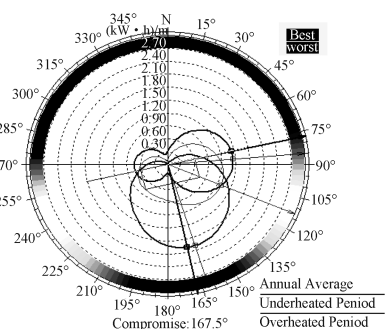
图4所示为4个典型城市中体育馆的最佳朝向分析图。首先对广州、南宁、昆明及西昌地区体育馆建立简化模型, 然后查询各地区的城市外部风参数进而对风环境进行模拟, 根据广州、南宁、昆明及西昌地区四季的特点, 模拟了相应地区典型体育馆内部的气流组织, 并且根据对应的体育馆的气流组织特性提出了合理的自然通风建议。



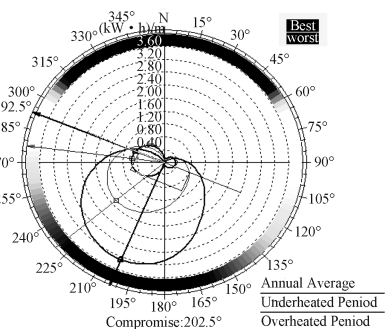
a) 广州



b) 南宁



c) 昆明



d) 西昌

图4 4个典型城市中体育馆的最佳朝向分析图

Fig. 4 Optimal orientation analysis of gymnasiums in four typical cities

2.2 不同气候地区体育馆自然通风模拟分析

2.2.1 I区——夏热冬暖地区

1) 广州

图5为广州地区体育馆四季不同高度风速分布图。

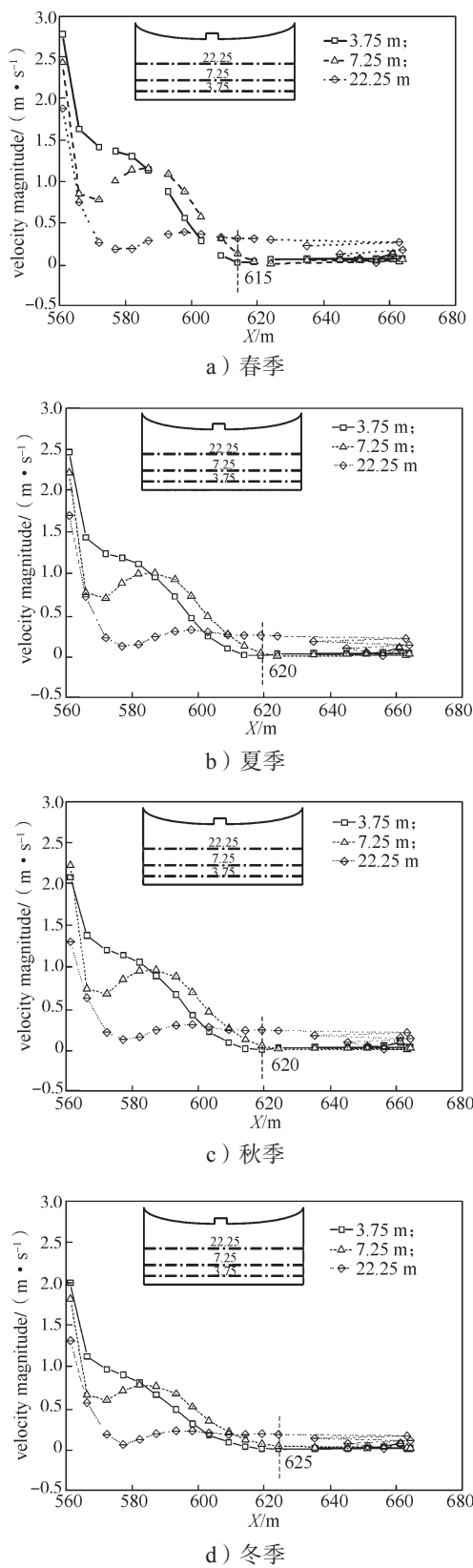


图5 广州地区体育馆四季不同高度的风速分布

Fig.5 Wind speed distribution in gymnasium of Guangzhou at different heights in four seasons

如图5, 广州地区体育馆进口风速为2 m/s左右, 内部平均风速为0.42 m/s。按照模拟, 体育馆的跨度

为风速最低点的距离与初始距离之差, 根据风速模拟, 秋夏体育馆最大宽度可以设置为60 m, 春季体育馆最大宽度可以设置为55 m, 冬季体育馆最大宽度可以设置为65 m。

2) 南宁

图6为南宁地区体育馆四季不同高度风速分布图。

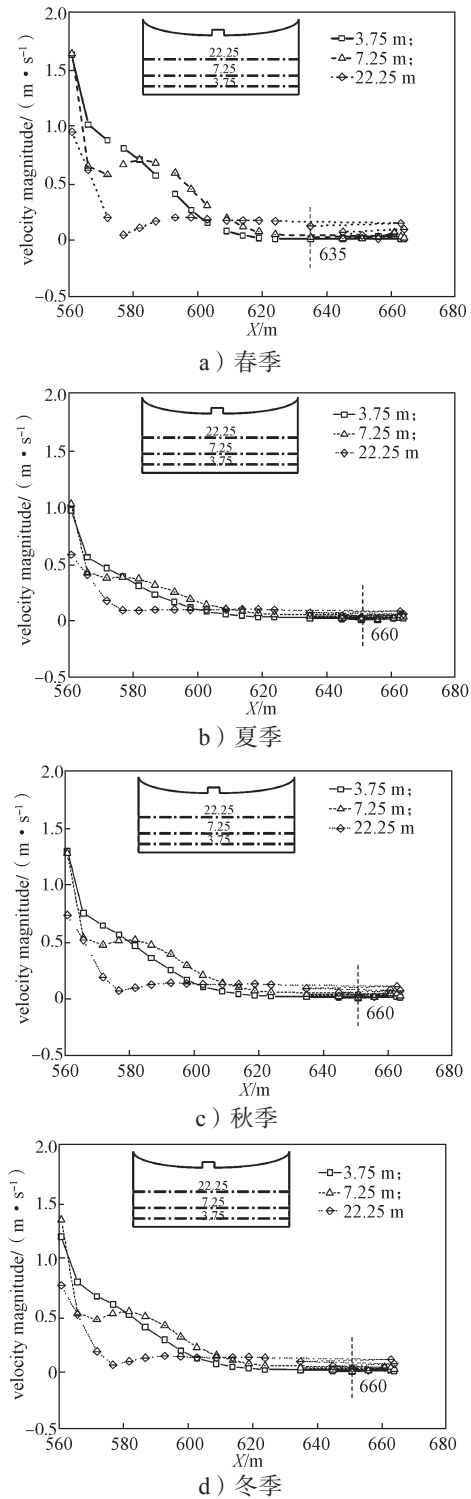


图6 南宁地区体育馆四季不同高度风速分布

Fig. 6 Wind speed distribution in gymnasium of Nanning at different heights in four seasons

如图6, 南宁地区体育馆进口风速为 1.5 m/s 左右, 内部平均风速为 0.24 m/s。根据四季风速模拟要求, 在夏秋冬季体育馆最大宽度为 90 m, 而在春季体育馆最大宽度为 75 m。

2.2.2 II 区——温和地区

1) 昆明

图7为昆明地区体育馆四季不同高度风速分布图。

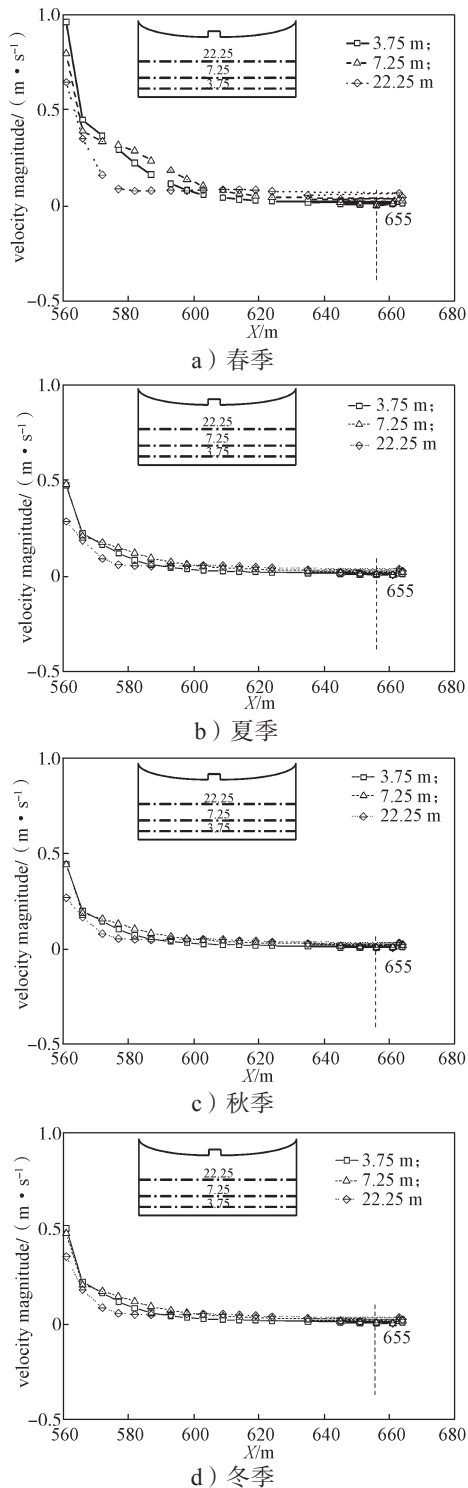


图7 昆明地区体育馆四季不同高度的风速分布
Fig.7 Wind speed distribution in gymnasium of Kunming at different heights in four seasons

从图7中可以看出, 昆明地区体育馆进口风速为 0.5 m/s 左右。内部平均风速为 0.08 m/s。春夏秋冬四季的风速最低点均在 655 m 处; 根据四季风速模拟要求, 可以将体育馆最大宽度设置为 95 m。

2) 西昌

图8为西昌地区体育馆四季不同高度风速分布图。

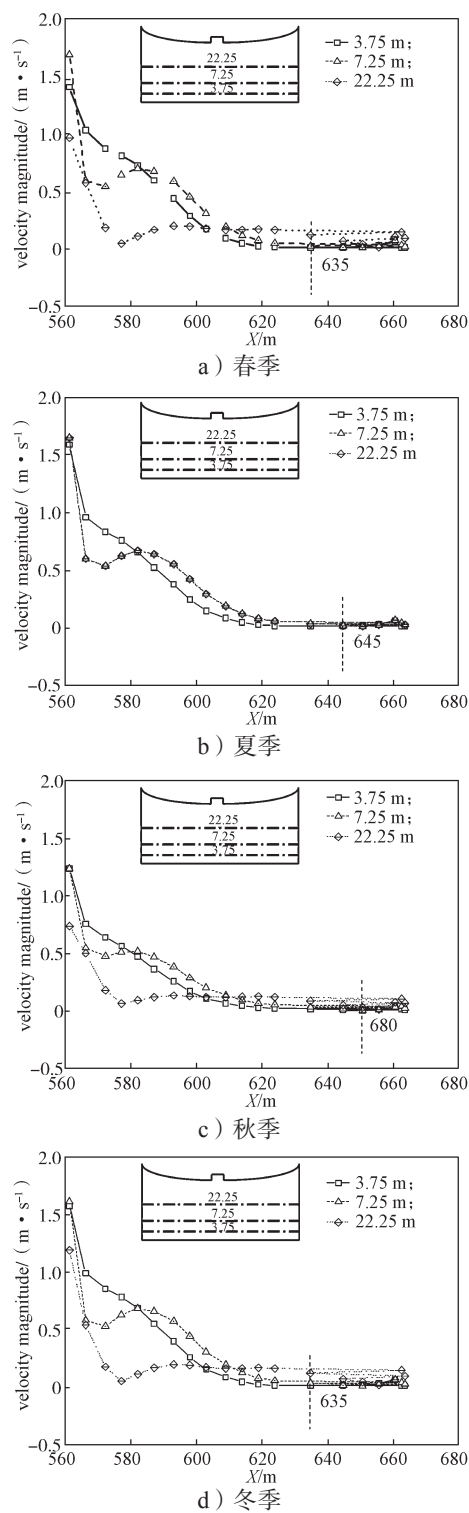


图8 西昌地区体育馆四季不同高度的风速分布
Fig.8 Wind speed distribution in gymnasium of Xichang at different heights in four seasons

从图8中可以看出,西昌地区体育馆的进口风速为1.5 m/s左右,内部平均风速为0.27 m/s。风速最低点分布如下:春季和冬季为635 m处,秋季为650 m处,夏季为645 m处。根据四季风速模拟要求,在春冬季节体育馆最大宽度为75 m,夏季体育馆最大宽度为85 m,秋季体育馆最大宽度为90 m。

2.3 不同地区体育馆自然通风模拟分析小结

不同地区典型城市体育馆建筑在不同季节的最长跨度分析模拟结果如表3所示。表3总结了不同地区的城市体育场馆在不同季节的最长跨度及最佳建筑朝向。

表3 不同地区典型城市体育馆建筑在不同季节的最长跨度及最佳建筑朝向

Table 3 Longest span of typical urban gymnasium buildings and best architectural orientation in different regions in different seasons

地点	建筑跨度 /m				最佳朝向 / (°)	
	春季为主	夏季为主	秋季为主	冬季为主		
I	广州	55	60	60	65	182.5
	南宁	75	90	90	90	175.0
II	昆明	95	95	95	95	190.0
	西昌	75	85	90	75	167.5

设计师可依靠建筑本身优势,合理地设计通道及增强空间所需通风,以便最大程度地节省能量。

3 体育馆自然通风潜力分析

自然通风潜力(natural ventilation potential, NVP),指仅通过自然通风来维持可接受的室内空气质量的可能性或潜力^[16]。因为建筑周围环境的复杂性,内部空气质量标准、自身的结构特性、开窗的位置和大小、四周的通风环境、内部温度和湿度以及阳光直射方向等因素均可以影响自然通风潜力。

以相关地区体育馆周围风环境模拟得到的平均室内风速为基础,耦合典型风环境参数及普适服装等要点,并将这些因素作为热舒适分析的依据。将这些影响热舒适的各种因素进行统筹后,利用Ecotect软件进行模拟,同时利用焓湿图和通风可利用率体现人员活动对热舒适性的影响,得到相关地区典型体育馆逐月及年自然通风可利用率。通风潜力以模拟得到的自然通风可利用率数据为依据,以此表明典型城市体育场馆自然通风利用的潜力。

3.1 不同地区自然通风潜力的结果分析

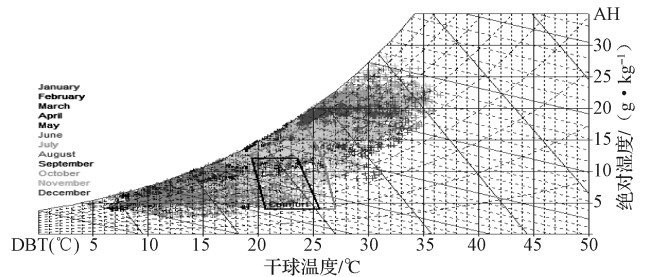
3.1.1 I区——夏热冬暖地区

1) 广州

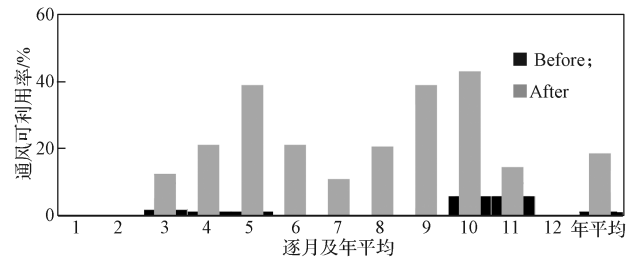
根据风环境模拟得广州平均室内风速为0.42 m/s,利用焓湿图及通风可利用率表示广州地区体育馆自

然通风潜力,如图9所示。

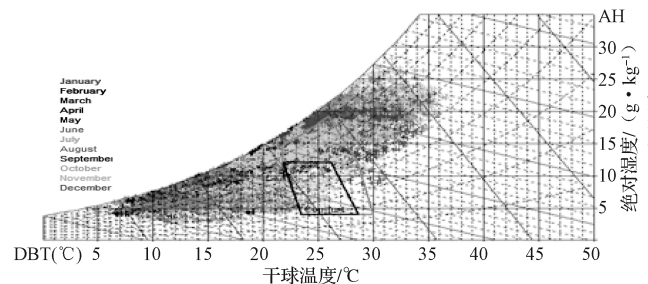
从焓湿图和通风可利用率结果可以看出,夏季通风可利用率较春冬季节高。而广州地区体育馆建筑通风可利用率趋势为随着人员活动增加,夏秋季的利用率不断减少,春冬季逐渐增加。



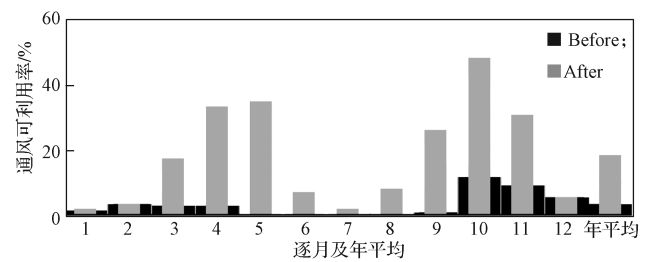
a) 无人时热舒适区域



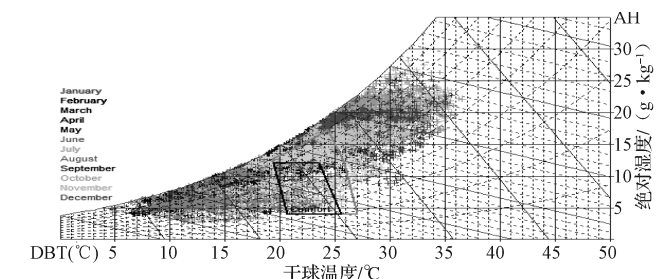
b) 无人时通风可利用率



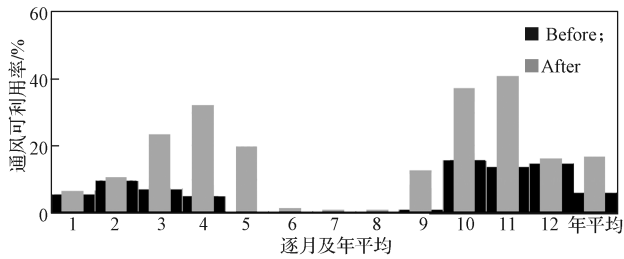
c) 静坐时热舒适区域



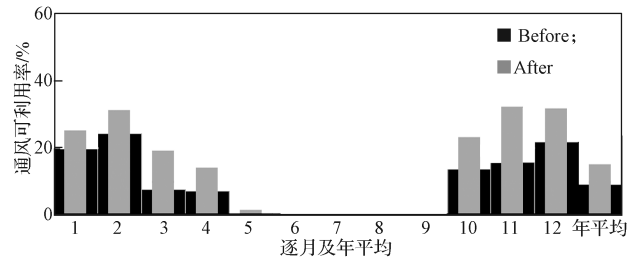
d) 静坐时通风可利用率



e) 较少活动时热舒适区域



f) 较少活动时通风可利用率



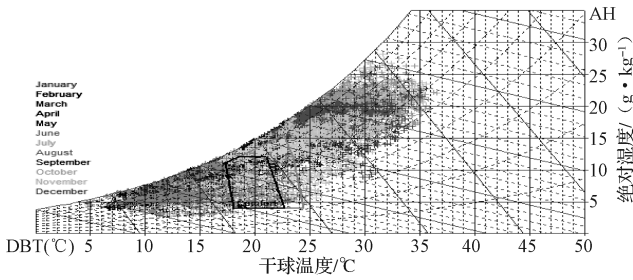
j) 重度活动时通风可利用率

图9 广州地区体育馆不同人员活动时自然通风潜力分析
Fig. 9 Analysis of natural ventilation potential for different human activities in gymnasiums of Guangzhou

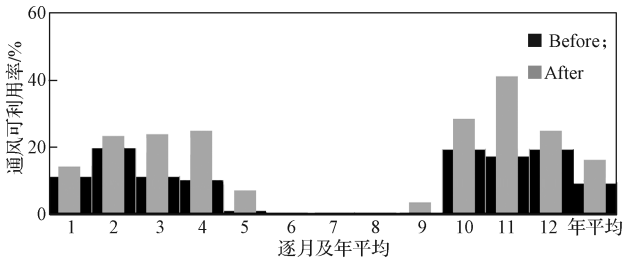
从表4的自然通风潜力分析结果可以看出, 随着人员活动的增强, 广州地区体育馆建筑的年自然通风潜力变化较少。

表4 广州地区体育馆不同人员活动时的年自然通风潜力
Table 4 Annual natural ventilation potential for different human activities in gymnasiums of Guangzhou

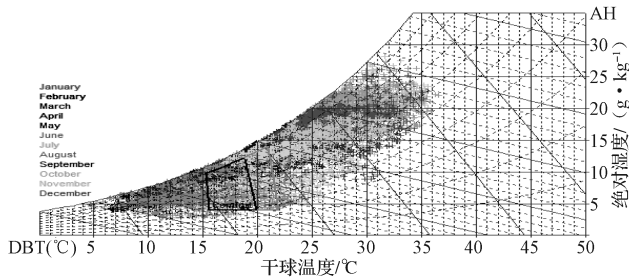
人员活动情况	年自然通风利用率/%	小时数/h
无人	19	1 664
静坐	18	1 577
较少活动	16	1 400
中等活动	16	1 400
重度活动	16	1 400



g) 中等活动时热舒适区域



h) 中等活动时通风可利用率



i) 重度活动时热舒适区域

2) 南宁

基于风环境模拟得南宁平均室内风速为0.24 m/s, 南宁地区体育馆自然通风利用率在夏季和秋季通风可利用率相应较高。而南宁地区体育馆建筑通风可利用率趋势为随着人员活动增加, 夏秋季的不断减少, 春冬季逐渐增加。南宁地区体育馆不同人员活动时的自然通风潜力分析结果如表5所示, 从表中数据可以看出, 南宁地区体育馆建筑的年自然通风潜力随着人员活动的增强逐渐减少。

表5 南宁地区体育馆不同人员活动时的自然通风潜力

Table 5 Potential of natural ventilation for different human activities in gymnasium of Nanning

人员活动情况	自然通风可利用率/%													小时数/h
	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月	年平均	
无人	2	4	9	20	41	29	18	22	39	22	12	0	18	1 577
静坐	8	10	16	30	34	10	2	8	28	30	20	4	17	1 491
较少活动	16	16	20	30	20	8	0	0	14	28	26	14	16	1 400
中等活动	24	18	28	28	10	3	0	0	4	18	28	20	15	1 314
重度活动	24	18	26	13	3	0	0	0	0	10	28	30	13	1 117

3.1.2 II区——温和地区

1) 昆明

基于风环境模拟得昆明平均室内风速为0.08 m/s, 昆明地区体育馆自然通风潜力在夏季和秋季通风可利用率相应较高, 随着人员活动的增加, 7~9月通风

可利用率减少, 其他月份通风可利用率增加。昆明地区体育馆不同人员活动时的自然通风潜力分析结果如表6所示, 从表中数据可以看出, 昆明地区体育馆建筑的年自然通风潜力随着人员活动的增强先增加后减少。

表6 昆明地区体育馆不同人员活动时的自然通风潜力

Table 6 Potential of natural ventilation for different human activities in gymnasium of Kunming

人员活动情况	自然通风可利用率/%													小时数/h
	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月	年平均	
无人	0	0	3	13	17	28	20	19	15	5	0	0	10	876
静坐	0	0	12	24	24	42	40	35	25	12	2	0	18	1 577
较少活动	0	2	21	26	31	45	49	48	36	27	7	1	24	2 102
中等活动	1	9	21	29	41	29	28	29	34	31	11	3	22	1 927
重度活动	9	13	21	32	32	14	4	3	18	32	25	12	18	1 577

2) 西昌

基于风环境模拟得西昌平均室内风速为 0.27 m/s, 西昌地区体育馆自然通风潜力在夏季和秋季通风可利用率相应较高, 随着人员活动增加, 夏秋季的通风可

利用率减少, 春冬季的通风可利用率增加。西昌地区体育馆不同人员活动时的自然通风潜力分析结果如表 7 所示, 从表中数据可以看出, 随着人员活动的增强, 西昌地区体育馆建筑的年自然通风潜力变化较少。

表7 西昌地区体育馆不同人员活动时的自然通风潜力

Table 7 Potential of natural ventilation for different human activities in gymnasium of Xichang

人员活动情况	自然通风可利用率/%													小时数/h
	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月	年平均	
无人	0	0	8	18	22	33	32	33	18	9	12	0	14	1 226
静坐	0	2	11	22	28	35	40	48	27	19	20	1	20	1 752
较少活动	0	7	11	22	35	31	33	46	33	27	26	6	22	1 927
中等活动	3	11	12	27	40	22	16	24	36	35	28	12	22	1 927
重度活动	10	14	14	28	31	13	7	6	30	40	28	19	20	1 752

3.2 不同地区自然通风潜力的分析小结

结合广州、南宁、昆明及西昌地区体育馆典型风环境参数及本地人的普适服装作为热舒适分析的依据, 运用 Ecotect 软件附带的 Weather Tool 软件对模型进行热环境分析, 最终软件统计出各个模型的逐月及年自然通风可利用率。得到的 4 个典型城市体育馆不同人员活动的自然通风潜力如表 8 所示。

表8 不同地区体育馆不同人员活动的自然通风潜力

Table 8 Potential of natural ventilation for different human activities in urban gymnasium in different areas

地点	无人/ %	人员 静坐/%	较少 活动/%	中等 活动/%	重度 活动/%	最优 季节
I 广州	19	18	16	16	16	夏秋
南宁	18	17	16	15	13	夏秋
II 昆明	10	18	24	22	18	夏秋
西昌	14	20	22	22	20	夏秋

4 结论

体育馆运用自然通风技术, 主要是在合适的季节利用自然通风调节室内温湿度, 尽量减少空调系统的使用。自然通风不光能降低能耗, 而且可以提高室内热舒适度。对夏热冬暖与温和地区的广州、南宁、昆明及西昌典型城市的体育馆模拟中得到自然通风在夏季和秋季中有较好的效果。通过对体育馆内部气

流组织问题以及体育馆自然通风潜力研究, 得到以下结论:

1) 列举了夏热冬暖和温和地区 4 个典型城市体育馆建筑样本及其各个季节理论最长空间跨度, 并通过数值模拟计算了最长跨度和风压驱动自然通风换气性能。根据模拟得知 4 个典型城市体育馆的最佳朝向为 $167.5^{\circ} \sim 190^{\circ}$ (即东南和西南方向), 以及最合适的自然通风跨度, 约为 55~95 m。

2) 通过建立自然通风潜力分析评估系统的框架和模型, 并根据典型城市的风环境、气象数据以及典型的居民服饰等因素进行分析, 得到了 4 个典型城市自然通风潜力最大的季节在夏季和秋季。其中昆明和西昌的自然通风潜力值比广州和南宁的相对较大。

3) 通过研究中国不同地区的典型城市自然通风潜力随着人员活动强度变化的影响, 得知其中 I 区广州和南宁体育馆建筑自然通风潜力随着人员活动的增加而降低, II 区昆明和西昌体育馆建筑自然通风潜力随着人员活动的增加而先增加后减少。总体看广州、南宁、昆明及西昌地区典型体育馆自然通风潜力数值随着人员活动变化基本在 3%~8% 范围内波动。

参考文献:

[1] 李 静. 基于系统优化的高校体育馆自然采光和通风

- 节能设计研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- LI Jing. Research on Energy-Saving Design of Daylighting and Natural Ventilation of University Gymnasium Based on System Optimization[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [2] 李 静, 李桂文. 基于天窗采光的建筑节能优化设计研究: 以严寒地区高校体育馆比赛厅为例[J]. 城市建筑, 2010(8): 112-113.
- LI Jing, LI Guiwen. Study of Building Energy-Saving Optimization Design Based on the Skylighting: Taking the Tournament Hall of University Gymnasiums in Severe Cold Areas as Example[J]. Urbanism and Architecture, 2010(8): 112-113.
- [3] 李 晋, 张 威, 游 媛, 等. 湿热地区体育馆被动形态与太阳辐射关系研究[J]. 南方建筑, 2011(1): 90-93.
- LI Jin, ZHANG Wei, YOU Yuan, et al. Research on the Relationship Between Gymnasiums' Passive Form and Solar Radiation in Hot and Humid Areas[J]. South Architecture, 2011(1): 90-93.
- [4] 赵 洋. 基于低能耗目标的严寒地区体育馆建筑设计研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- ZHAO Yang. Research on Gymnasium Design with Low-energy Consumption in Severe Cold Area of China[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [5] VAN HOOFF T, BLOCKEN B. Full-Scale Measurements of Indoor Environmental Conditions and Natural Ventilation in a Large Semi-Enclosed Stadium: Possibilities and Limitations for CFD Validation[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2012, 104/105/106: 330-341.
- [6] 蓝 飞. 建筑领域自然通风应用研究综述[J]. 有色冶金设计与研究, 2014, 35(2): 40-43.
- LAN Fei. Research Review on Application of Natural Ventilation for Architecture Field[J]. Nonferrous Metals Engineering & Research, 2014, 35(2): 40-43.
- [7] BOUYER J, VINET J, DELPECH P, et al. Thermal Comfort Assessment in Semi-Outdoor Environments: Application to Comfort Study in Stadia[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2007, 95(9/10/11): 963-976.
- [8] SZUCS A, MOREAU S, ALLARD F. Spectators' Aerothermal Comfort Assessment Method in Stadia[J]. Building and Environment, 2007, 42(6): 2227-2240.
- [9] LAM J C, CHAN A L S. CFD Analysis and Energy Simulation of a Gymnasium[J]. Building and Environment, 2001, 36(3): 351-358.
- [10] VAN HOOFF T, BLOCKEN B, VAN HARTEN M. 3D CFD Simulations of Wind Flow and Wind-Driven Rain Shelter in Sports Stadia: Influence of Stadium Geometry[J]. Building and Environment, 2011, 46(1): 22-37.
- [11] VAN HOOFF T, BLOCKEN B. Coupled Urban Wind Flow and Indoor Natural Ventilation Modelling on a High-Resolution Grid: A Case Study for the Amsterdam Arena Stadium[J]. Environmental Modelling & Software, 2010, 25(1): 51-65.
- [12] BANSAL N K. Emerging Trends for Energy Efficiency in Buildings[C]//World Renewable Energy Congress VI. Brighton: Pergamon, 2000: 350-355.
- [13] BUCK J, YOUNG D. The Potential for Energy Efficiency Gains in the Canadian Commercial Building Sector: A Stochastic Frontier Study[J]. Energy, 2007, 32(9): 1769-1780.
- [14] MEDRANO M, BROUWER J, MCDONELL V, et al. Integration of Distributed Generation Systems into Generic Types of Commercial Buildings in California[J]. Energy and Buildings, 2008, 40(4): 537-548.
- [15] 曹岳超. 基于自然通风模拟的体育馆界面形态设计研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- CAO Yuechao. Design Strategy in Stadium Interface Morphology on Ventilation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [16] GERMANO M, ROULET C A, ALLARD F, et al. Potential for Natural Ventilation in Urban Context: an Assessment Method[C]//Proceedings of EPICAIVC Conference Energy Efficient and Healthy Buildings in Sustainable Cities. Lyon: Air Infiltration and Ventilation Centre, 2002, 519-525.

(责任编辑: 申 剑)